

Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Н.П. ЕРМОЛИН

**КАК РАССЧИТАТЬ
МАЛОМОЩНЫЙ
СИЛОВОЙ
ТРАНСФОРМАТОР**

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
15	12 сверху	$j =$	$\beta =$
24	9 сверху	$\sqrt{2 W_1}$	$\sqrt{2} \cdot W_1$
41	15 сверху	$\eta \cos \varphi_2 = 0,7 \div 0,8$	$\eta \cos \varphi_1 = 0,7 \div 0,8$
44	2 снизу	$U_2 \eta \cos \varphi_2$	$U_1 \eta \cos \varphi_1$

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

ВЫПУСК 33

Н. П. ЕРМОЛИН

КАК РАССЧИТАТЬ
МАЛОМОЩНЫЙ
СИЛОВОЙ
ТРАНСФОРМАТОР



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-3-3
6П2.12
Е 74

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:
Васильев А. А., Долгов А. Н., Ежков В. В.,
Смирнов А. Д., Устинов П. И.

В брошюре излагается упрощенный расчет маломощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов в диапазоне мощностей от нескольких единиц до нескольких сотен вольтампер. Дается пересчет этих трансформаторов на другие технические данные при ремонте и перемотке их.

Брошюра предназначена в качестве практического руководства для электромонтеров, занятых ремонтом и перемоткой силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

Ермолин Николай Пантелеймонович

КАК РАССЧИТАТЬ МАЛОМОЩНЫЙ СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР

М.-Л., Госэнергоиздат, 1961. 52 с., с рис. (Библиотека электромонтера, вып. 33). 6П2.12

Редактор

П. Я. Бергман

Технич. редактор **О. С. Житникова**

Сдано в набор 9/VIII 1960 г. Подп. к печати 1/II 1961 г.
М-37562. Печ. л. 2,66. Уч.-изд. л. 2,3 Бум. л. 0,81.
Формат 84 × 108¹/₃₂. Тираж 35 000. Цена 8 коп. Заказ № 676.

Типография № 1 Госместпромиздата, Ленинград, Фонтанка, 62

ПРЕДИСЛОВИЕ

Как известно, в многочисленных современных радио-устройствах и различных схемах с электронными и ионными приборами широкое применение получили мало-мощные силовые однофазные и трехфазные трансформаторы и автотрансформаторы в диапазоне мощностей от нескольких единиц до нескольких сотен вольтампер.

Автотрансформатор отличается от трансформатора тем, что он имеет одну обмотку, часть которой одновременно принадлежит первичной и вторичной цепям (см. рис. 11).

Основным назначением маломощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов является питание накальных и анодных цепей и других элементов указанных радио- и электронных устройств.

Расчет маломощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов в упомянутом выше диапазоне мощностей несколько отличается от порядка расчета обыкновенных трансформаторов большой мощности.

Настоящая брошюра имеет своей целью дать упрощенный расчет маломощных силовых однофазных и трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов в диапазоне мощностей от нескольких единиц до нескольких сотен вольтампер и пересчет этих трансформаторов на другие технические данные при ремонте и перемотке их.

Предназначенная в качестве практического руководства для производителей, занятых ремонтом и перемоткой маломощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов, брошюра может служить также пособием по проектированию маломощных трансформаторов для учащихся электротехнических, радиотехнических, электровакуумных и электроприборостроительных техникумов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Глава первая

Маломощные силовые трансформаторы

I. Общие сведения	6
II. Упрощенный расчет маломощных силовых однофазных и трехфазных трансформаторов	12
1. Определение токов трансформатора	—
2. Выбор индукции в стержне сердечника и плотности тока в проводах обмоток трансформатора	14
3. Определение поперечного сечения стержня и ярма сердечника трансформатора	15
4. Определение числа витков обмоток трансформатора	17
5. Определение сечения и диаметра провода обмотки	18
6. Выбор размеров окна сердечника и укладка обмо- ток на стержнях трансформатора	—
7. Вес меди и потери обмоток трансформатора	21
8. Вес стали и потери сердечника трансформатора	22
9. Ток холостого хода трансформатора	23
10. Коэффициент полезного действия трансформатора	25
11. Падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора	—
12. Проверка трансформатора на нагревание	27

Глава вторая

Маломощные силовые автотрансформаторы

Упрощенный расчет маломощных однофазных автотрансфор- маторов	34
1. Расчетная мощность и токи автотрансформатора	—
2. Выбор индукции в стержне сердечников и плотности тока в проводах обмотки автотрансформатора	35
3. Определение поперечного сечения стержня и ярма сердечника автотрансформатора	36
4. Определение числа витков обмотки автотрансфор- матора	—

	Стр.
5. Определение сечения и диаметра провода обмотки	37
6. Определение размеров окна сердечника и укладка обмотки на стержнях автотрансформатора . . .	—
7. Вес меди и потери обмотки автотрансформатора .	38
8. Вес стали и потери сердечника автотрансформатора	—
9. Ток холостого хода автотрансформатора	—
10. Коэффициент полезного действия и изменение напряжения автотрансформатора при нагрузке . . .	39
11. Проверка автотрансформатора на нагревание . . .	—

Глава третья

Пересчет маломощных силовых трансформаторов при ремонте и перемотке их

Пересчет маломощных силовых трансформаторов на другие технические данные	40
П р и л о ж е н и я	47

ГЛАВА ПЕРВАЯ

МАЛОМОЩНЫЕ СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Проектирование трансформаторов складывается из расчета и конструирования их. Расчет трансформатора в общем представляет собой математически неопределенную задачу со многими решениями, так как число определяемых неизвестных больше числа уравнений, связывающих их. Вследствие этого в процессе расчета трансформатора приходится задаваться определенными значениями некоторых исходных электромагнитных и конструктивных величин, базируясь на опыте построенных трансформаторов. В связи с этим при проектировании нового трансформатора обычно получается несколько расчетных вариантов его, из которых и выбирается наивыгоднейший.

Расчет и опыт показывают, что можно рассчитать и построить трансформатор с высоким к.п.д., однако это не является еще признаком наивыгоднейшего варианта трансформатора, так как при выборе его нужно учитывать также и другие технико-экономические показатели, как, например, размеры, вес и стоимость трансформатора. Уменьшение веса и стоимости трансформатора связано с увеличением индукции в сердечнике и плотности тока в обмотках, что ведет к увеличению потерь в стали и меди трансформатора, а следовательно, к повышению нагрева его. При этом к.п.д. трансформатора уменьшается.

Предельно допустимый нагрев маломощных силовых трансформаторов для обычной изоляции обмоток класса А может составлять $100\text{—}105^{\circ}\text{C}$, и для класса Е — $115\text{—}120^{\circ}\text{C}$ или превышение температуры над окружающей средой $65\text{—}70^{\circ}\text{C}$ и $80\text{—}85^{\circ}\text{C}$ при температуре этой

среды $+35^{\circ}\text{C}$. Следовательно, пределом использования активных материалов является нагрев трансформаторов.

Маломощные силовые трансформаторы большей частью строятся однофазными, однако в ряде случаев встречаются также и трехфазные трансформаторы. Эти трансформаторы имеют обычно естественное воздушное охлаждение.

Как известно, в трансформаторах вес стали сердечника и вес меди обмоток находятся во взаимно обратной зависимости, т. е. при увеличении веса активной стали расход меди на обмотки уменьшается. Так как цена обмоточной меди в маломощных трансформаторах значительно выше стоимости стали, то отношение веса стали к весу меди в них принимается выше, чем для трансформаторов большой мощности.

Таким образом, правильно рассчитанный маломощный силовой трансформатор должен иметь минимальные стоимость и вес, удовлетворять заданным техническим требованиям и иметь возможно высокий к.п.д.

Типы маломощных силовых трансформаторов

Маломощные силовые трансформаторы строятся:

- а) стержневого типа (рис. 1 и 3);
- б) броневое типа (рис. 2);
- в) тороидального типа (рис. 4).

Большинство маломощных силовых трансформаторов обычно строится броневое типа. Однако трансформаторы стержневого и тороидального типов также находят достаточное применение.

Трехфазные маломощные силовые трансформаторы выполняются стержневого типа или из штампованных Ш-образных пластин (рис. 3, а), или из прямоугольных пластин (рис. 3, б).

Крепление сердечника трансформатора

В маломощных силовых трансформаторах применяются два основных способа крепления собранного пакета сердечника.

1. Крепление с помощью шпилек. В этом случае пакет сердечника трансформатора сжимается с помощью шпилек и скоб из полосовой стали толщиной 1—2 мм (рис. 5).

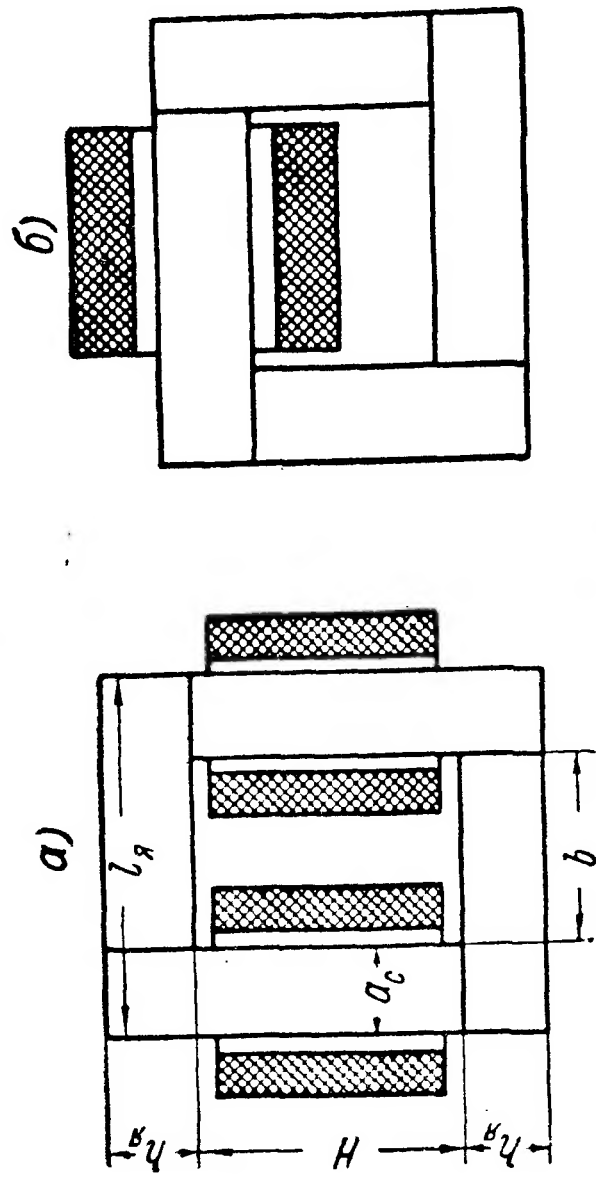


Рис. 1. Трансформаторы стержневого типа:
а — с двумя катушками; б — с одной катушкой.

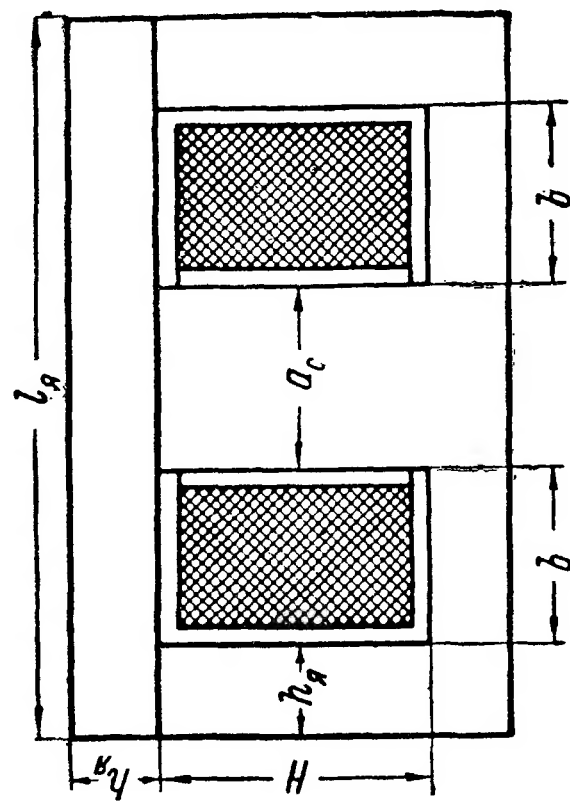


Рис. 2. Трансформатор броневого типа.

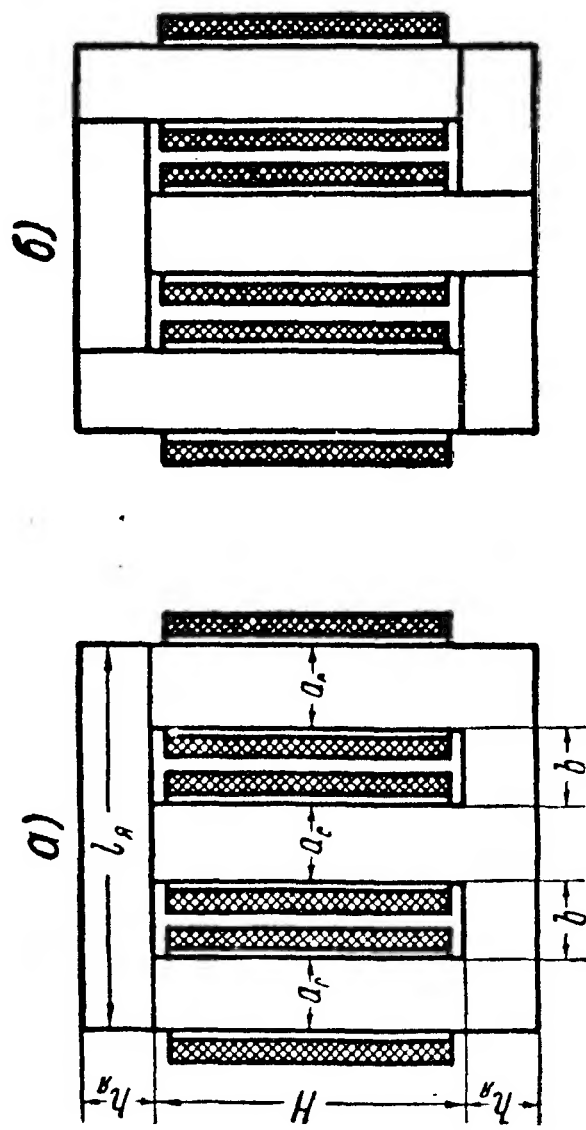


Рис. 3. Трехфазные трансформаторы с различной
штамповкой пластин:
а — с Ш-образными; б — с прямоугольными пластинами.

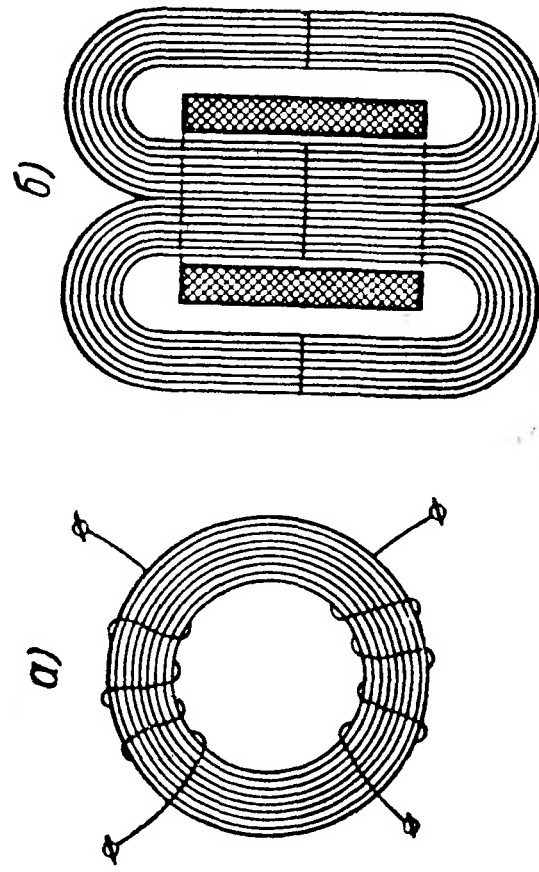


Рис. 4. Трансформаторы с витыми
сердечниками:
а — тороидальным; б — Ш-образным.

В броневых трансформаторах для крепления сердечника иногда применяется штампованная из листовой стали деталь, служащая одновременно и кожухом трансформатора (рис. 6).

2. Крепление запрессовкой сердечника в обойму. В этом случае собранный пакет сердечника трансформатора обжимается специальной обоймой.

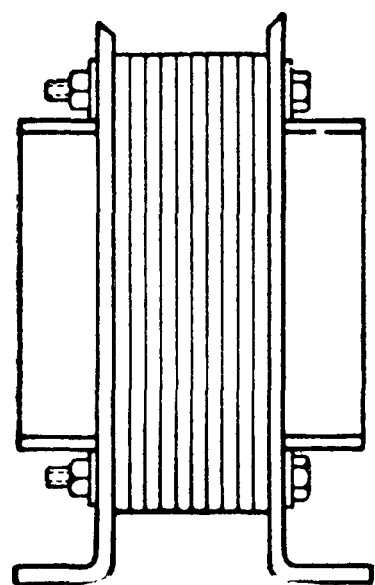


Рис. 5. Трансформатор с сердечником, стянутым накладками.

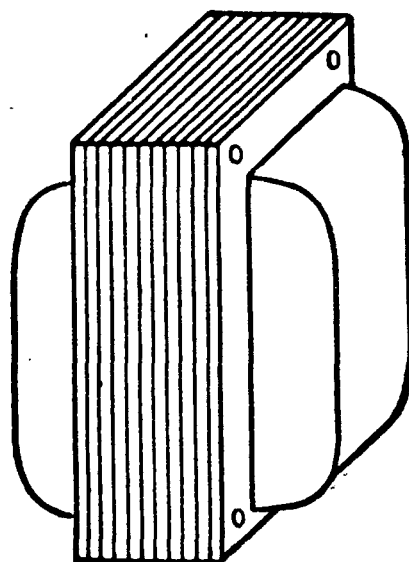


Рис. 6. Трансформатор с сердечником, стянутым штампованными крышками.

Заготовка пластин для сердечника трансформатора

Материалом для сердечника маломощного силового трансформатора служит специальная листовая электротехническая сталь марок Э41, Э11 и другие толщиной листа 0,50 и 0,35 мм. Основные технические данные листовой стали различных марок определяются ГОСТ 802-58.

Обозначения, например, указанных марок стали расшифровываются следующим образом: Э — электротехническая; первая цифра 4 — высоколегированная (с содержанием кремния до 5%); первая цифра 1 — слаболегированная (с содержанием кремния до 1%); вторая цифра 1 — с нормальными удельными потерями.

Для изготовления сердечника из листовой стали штампуются пластины П-образной формы — в случае однофазных стержневых трансформаторов и Ш-образной формы — для однофазных броневых и трехфазных

стержневых трансформаторов. При отсутствии возможности штамповки фигурных пластин производится заготовка прямоугольных пластин резкой листов на ножницах. Как при штамповке, так и при резке заготовок из листов стали желательно делать пластины вдоль направления прокатки стали, так как магнитная проницаемость стали в этом направлении несколько больше.

В целях уменьшения потерь на вихревые токи в сердечнике трансформатора листы стали покрываются с одной стороны или тонким слоем лака, или оксидируются.

Изготовление витых сердечников маломощных трансформаторов (рис. 4) производится из холоднокатаной стали марок Э310 и Э330 (ГОСТ 802-58) на специальных намоточных станках.

Конструкция катушек маломощных трансформаторов

Катушки маломощных силовых трансформаторов, имеющих обмотку из проводов малого диаметра, как

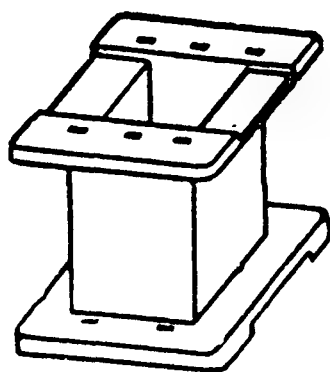


Рис. 7. Штампованный из пластмассы каркас катушки трансформатора.

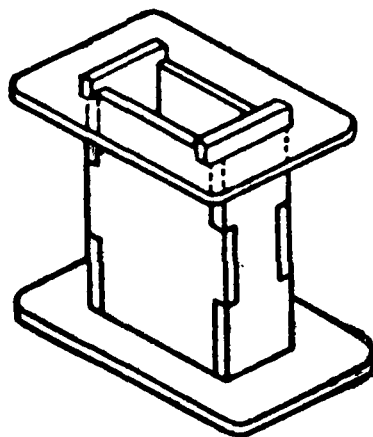


Рис. 8. Сборный каркас катушки трансформатора.

правило, выполняется в виде каркаса, на который наматываются обмотки. Каркасы катушек делаются обычно из изолирующего материала или путем штамповки из пластмассы (рис. 7), или клеенные из электрокартона, текстолита, гетинакса и других материалов (рис. 8).

Пропитка катушек изолирующим лаком

После намотки катушки должны быть пропитаны изолирующим лаком. Пропитка лаком повышает электри-

ческую прочность изоляции обмотки, увеличивает механическую прочность ее, увеличивает теплостойкость и теплопроводность изоляции, а также защищает обмотку от влаги. В качестве пропитывающих лаков могут быть использованы асфальтомазные лаки № 447 и 458, глифталевый лак № 321.

Перед пропиткой катушки должны быть просушены в течение 2—3 часов при температуре около 100°C . Пропитка катушек лаком производится при температуре $60\text{—}70^{\circ}\text{C}$ в течение 3—5 минут, а сушка лака при температуре $110\text{—}115^{\circ}\text{C}$ в течение 3—8 часов.

Выбор материала для сердечника

Как указывалось выше, материалом для сердечников маломощных силовых трансформаторов служит специальная листовая электротехническая сталь различных марок, обозначаемых по ГОСТ 802-58 в виде Э41, Э11, Э310 и Э320 и др. Выбор стали для сердечника определяется назначением трансформатора, частотой сети и техническими условиями задания.

Для маломощных трансформаторов минимальной стоимости в основном применяется сталь марки Э41 толщиной $\delta_c = 0,5\text{ мм}$ с удельными потерями $k_c = 1,6\text{ вт/кг}$ при $B = 10\,000\text{ гс}$, $f = 50\text{ гц}$ и $\delta_c = 0,35\text{ мм}$ с удельными потерями $k_c = 1,35\text{ вт/кг}$ при $B = 10\,000\text{ гс}$. Для маломощных трансформаторов можно иногда применить сталь марки Э11. Сталь марки Э11 мягкая, легче обрабатывается, чем сталь Э41, и дешевле по стоимости, но имеет повышенные удельные потери $k_c = 3,3\text{ вт/кг}$ при $B = 10\,000\text{ гс}$, $f = 50\text{ гц}$ и $\delta_c = 0,5\text{ мм}$.

Для трансформаторов минимального веса может быть применена холоднокатаная сталь с повышенной магнитной проницаемостью марок Э310 и Э320.

Для маломощных трансформаторов повышенной частоты (200—400 гц) может быть рекомендована сталь марок Э34, Э340, Э44, Э47 и Э48 с толщиной листа при мощностях до 100 в а — $\delta_c = 0,35\text{ мм}$, и при мощностях свыше 100 в а — $\delta_c = 0,20 \div 0,35\text{ мм}$ и пониженными удельными потерями.

При выборе толщины листа стали необходимо учитывать зависимость коэффициента заполнения поперечного сечения стержня сталью от этой толщины.

Средние значения коэффициента заполнения даны в табл. 1.

Таблица 1

Толщина листа, мм	Коэффициент заполнения поперечного сечения стержня сталью	Изоляция между листами
0,5	0,92	лак
0,35	0,86	„
0,2	0,76	„
0,1	0,65	„

II. УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ СИЛОВЫХ ОДНОФАЗНЫХ И ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

При упрощенном расчете маломощных силовых трансформаторов практически достаточно ограничиться рассмотрением только двухобмоточных трансформаторов, так как многообмоточные трансформаторы в принципе не отличаются от двухобмоточных, имея одну первичную и несколько вторичных обмоток.

Исходными данными для расчета маломощных силовых трансформаторов являются следующие величины:

число фаз — m ;

номинальная мощность или ток вторичной обмотки — $P_2[ва]$ или $I_2[a]$;

номинальные напряжения — U_1 и $U_2[в]$;

частота сети — $f[гц]$;

коэффициент мощности нагрузки — $\cos \varphi_2$.

1. Определение токов трансформатора

При определении тока первичной обмотки следует учитывать потери, а также намагничивающий ток трансформатора, относительная величина которых в маломощных силовых трансформаторах весьма значительна.

Величины токов могут быть определены по следующим формулам:

а) однофазный трансформатор:

$$I_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1} [a], \quad I_2 = \frac{P_2}{U_2} [a];$$

б) трехфазный трансформатор:

$$I_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} U_1 \eta \cos \varphi_1} [a], \quad I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_2} [a],$$

где U_1 и U_2 — напряжения обмоток по заданию;

P_2 — мощность вторичной обмотки по заданию;

$\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности нагрузки по заданию;

η — к.п.д. трансформатора, предварительно выбираемый по кривой рис. 9.

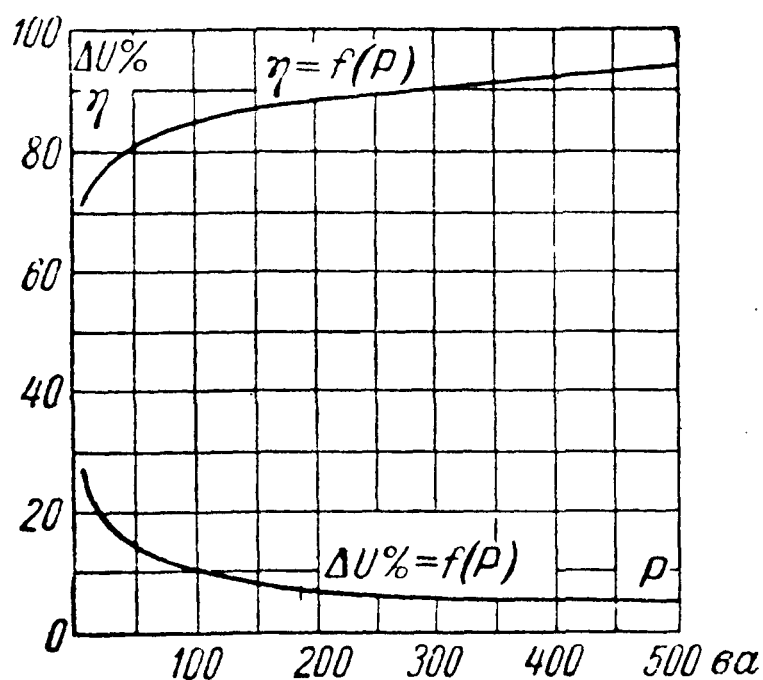


Рис. 9. Кривые зависимости к.п.д. и падения напряжения маломощных трансформаторов от мощности.

Так как в большинстве случаев нагрузка маломощных трансформаторов обычно активная ($\cos \varphi_2 = 1$), то коэффициент мощности первичной цепи практически можно определить по формуле:

$$\cos \varphi_1 \approx \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{I_\mu}{I_{1a}} \right)^2}}.$$

Как показывают расчет и опыт, для маломощных трансформаторов с активной нагрузкой величина отно-

шения намагничивающего тока I_μ к активной составляющей первичного тока I_{1a} в среднем составляет около $\frac{I_\mu}{I_{1a}} = 0,4 \div 0,6$, поэтому коэффициент мощности первичной цепи этих трансформаторов обычно находится в пределах $\cos \varphi_1 = 0,86 \div 0,92$.

2. Выбор индукции в стержне сердечника и плотности тока в проводах обмоток трансформатора

Допустимая величина индукции в стержне и ярме сердечника трансформатора определяется выбранным значением намагничивающего тока, мощностью, частотой, типом трансформатора, числом стыков в сердечнике и материалом последнего. Для трансформаторов стержневого и броневыего типов мощностью несколько десятков или сотен вольтампер с сердечником из листовой электротехнической стали марок Э41 и Э11 (ГОСТ 802-58) индукцию в стержне сердечника можно принять в следующих пределах:

$$B_c = 12\,000 \div 13\,000 \text{ гс.}$$

В случае сердечника трансформатора из холоднокатаной стали марок Э310, Э320 и Э330 эту индукцию можно принять:

$$B_c = 15\,000 \div 16\,000 \text{ гс.}$$

В трансформаторах повышенной частоты (200—400 гц) величина индукции в стержне определяется величиной потерь и нагревом его. Обычно в этом случае индукция в стержне составляет не более 5000—7000 гс.

Допускаемая величина плотности тока в проводах обмоток трансформатора в значительной мере определяет вес и стоимость последнего. Чем выше плотность тока в обмотках, тем меньше вес меди их и соответственно стоимость трансформатора. С другой стороны, с увеличением плотности тока возрастают потери в меди обмоток и нагрев трансформатора.

В трансформаторах мощностью примерно до 100 в $\bar{a}$ допускаемая плотность тока в проводах обмоток может составлять:

$$j = 4,5 \div 3,5 \text{ а/мм}^2.$$

В трансформаторах мощностью свыше 100 *ва* и до нескольких сотен вольтампер эта плотность обычно составляет:

$$j = 3,5 \div 2,5 \text{ а/мм}^2.$$

3. Определение поперечного сечения стержня и ярма сердечника трансформатора

Отношение потерь в меди обмоток трансформатора к потерям в стали сердечника в маломощных силовых трансформаторах, работающих приблизительно при номинальных нагрузках, по условиям максимума к. п. д. желательно иметь в пределах:

$$j = \frac{P_m}{P_c} = 1,2 \div 1,8.$$

Отношение веса стали сердечника к весу меди обмоток составляет:

$$\alpha = \frac{G_c}{G_m} = \frac{2,4}{K_c} \left(\frac{j}{B_c \cdot 10^{-4}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\beta},$$

где B_c и j берутся из позиции 2.

Удельные потери в стали сердечника k_c при $B = 10\,000$ *гс* и $f = 50$ *гц*, по данным ГОСТ 802-58, в зависимости от марки стали и толщины листа δ_c , составляют:

марка стали Э41:

при $\delta_c = 0,50$ *мм* $k_c = 1,60$ *вт/кг*

„ $\delta_c = 0,35$ „ $k_c = 1,35$ „

марка стали Э11:

при $\delta_c = 0,50$ *мм* $k_c = 3,3$ *вт/кг*

марки стали Э310 и Э320:

при $\delta_c = 0,50$ *мм* $k_c = 1,25$ *вт/кг*; $k_c = 1,15$ *вт/кг*

„ $\delta_c = 0,35$ „ $k_c = 1,00$ „ ; $k_c = 0,90$ „

Поперечное сечение стержня сердечника трансформатора определяется по следующей формуле:

$$S_c \approx C \sqrt{\frac{P_1 \alpha \cdot 10^6}{f B_c j}} \text{ [см}^2\text{]},$$

где $P_1 = U_1 I_1$ — потребляемая мощность однофазным трансформатором, *ва*;

$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1$ — то же, трехфазным трансформатором, *ва*;

$\alpha = \frac{G_c}{G_m}$ — отношение веса стали к весу меди обмотки, определяемое по предыдущей формуле;

U_1 и f — берутся из задания, I_1 — из позиции 1, B_c и j — из позиции 2.

Постоянный коэффициент C в среднем может быть приближенно принят:

для однофазных стержневых трансформаторов	.	.	.	$C = 0,6$
» » броневых	»	.	.	$C = 0,7$
» трехфазных стержневых	»	.	.	$C = 0,4$

Поперечное сечение ярма трансформатора стержневого типа можно принять:

$$S_{\text{я}} = (1,0 \div 1,2) S_c \text{ [см}^2\text{]}.$$

Поперечное сечение ярма трансформатора броневое типа:

$$S_{\text{я}} = \frac{(1,0 \div 1,2) S_c}{2} \text{ [см}^2\text{]}.$$

Размер сторон квадратного поперечного сечения стержня (рис. 1, 2 и 3):

$$a_c = b_c = \sqrt{\frac{S_c}{k_3}} \text{ [см]}.$$

Возможно отступление от квадратной формы поперечного сечения стержня, при этом $b_c = (1,2 \div 2,0) a_c$.

Высота ярма (рис. 1, 2 и 3):

$$h_{\text{я}} = \frac{S_{\text{я}}}{k_3 b_c} \text{ [см]},$$

где k_3 — коэффициент заполнения сечения сердечника сталью, выбираемый из табл. 1 в зависимости от принятой толщины листа δ_c . По размерам a_c , b_c и $h_{\text{я}}$ можно выбрать ближайшую стандартную П-образную или Ш-образную пластины сердечника трансформатора из приложения II. В этом случае возможно отступление от квадратной формы поперечного сечения стержня для получения заданного сечения S_c ; при этом обычно $b_c \geq a_c$.

4. Определение числа витков обмоток трансформатора

Числа витков первичной и вторичной обмоток однофазного трансформатора определяются из выражений

$$W_1 = \frac{E_1 \cdot 10^8}{4,44 f B_c S_c}, \quad E_1 = U_1 - \frac{\Delta U [\%] U_1}{200},$$

$$W_2 = W_1 \frac{E_2}{E_1}; \quad E_2 = U_2 + \frac{\Delta U [\%] U_2}{200},$$

где U_1 и U_2 берутся из задания, B_c — из позиции 2, S_c — из позиции 3, ΔU — по кривой рис. 9.

Число витков на фазу первичной и вторичной обмоток трехфазного трансформатора при соединении их звездой:

$$W_1 = \frac{E_1 \cdot 10^8}{4,44 f B_c S_c}; \quad E_1 = \frac{U_1 - \frac{\Delta U [\%] U_1}{200}}{\sqrt{3}};$$

$$W_2 = W_1 \frac{E_2}{E_1}; \quad E_2 = \frac{U_2 + \frac{\Delta U [\%] U_2}{200}}{\sqrt{3}}.$$

При соединении обмоток треугольником при определении E_1 или E_2 не следует применять $\sqrt{3}$.

5. Определение сечения и диаметра провода обмотки

Предварительные значения поперечных сечений проводов обмоток определяются по формулам:

$$q'_1 = \frac{I_1}{j'_1} [\text{мм}^2], \quad q'_2 = \frac{I_2}{j'_2} [\text{мм}^2],$$

где I_1 и I_2 берутся из позиции 1, j'_1 и j'_2 — из позиции 2.

Окончательные значения поперечных сечений и диаметров проводов выбираются по ближайшим данным ГОСТ из приложения I:

$$q_1 = \dots \text{мм}^2; d_1/d_{1н} = \dots \text{мм}; q_2 = \dots \text{мм}^2; d_2/d_{2н} = \dots \text{мм}.$$

При сечении проводов $q > 10 \text{ мм}^2$ обмотку трансформатора следует выполнять проводом прямоугольной формы, или же при круглом проводе выполнять намотку обмотки в два-три параллельных провода.

Наибольшее применение для маломощных трансформаторов имеют провода марок ПЭЛ, ПЭТ и ПЭВ-2 с диаметрами до 1—2 мм и марки ПБД с диаметром свыше 1—2 мм.

Перечисленные марки проводов расшифровываются следующим образом:

ПЭЛ — провод эмалированный лакостойкий;

ПЭТ — провод эмалированный лакостойкий с повышенной теплостойкостью;

ПЭВ-2 — провод, изолированный высокопрочной эмалью в два слоя;

ПБД — провод, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи.

6. Выбор размеров окна сердечника и укладка обмоток на стержнях трансформатора

Форма окна сердечника трансформатора оказывает значительное влияние на величину намагничивающего тока, расход стали на сердечник и меди на обмотки трансформатора. Излишняя высота окна сердечника H повышает намагничивающий ток I_μ и увеличивает расход стали и вес трансформатора. Заниженная высота окна повышает нагрев обмотки и увеличивает расход меди на них.

Как показывает опыт, наивыгоднейшая форма окна сердечника трансформатора получается при отношении высоты окна H к его ширине b в пределах 2,5—3 (рис. 1, 2 и 3).

Если при расчете сердечника трансформатора принята стандартная форма П-образных или Ш-образных пластин из приложения II, то размеры H и b берутся из этого же приложения.

При расположении обмоток на стержнях сердечника трансформатора нужно иметь в виду следующее: чем меньше диаметр обмоточного провода, тем выше его стоимость. Поэтому для уменьшения общей стоимости трансформатора целесообразно обмотку с более тонким проводом располагать на стержне первой.

Для уточнения ширины окна сердечника b необходимо вычислить радиальную толщину обмоток трансформатора.

Число витков первичной обмотки в одном слое:

$$n_1 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{1и}},$$

где $d_{1и}$ — берется из позиции 5;

ε_1 — расстояние от обмотки до ярма, обычно $\varepsilon_1 = 2 \div 5$ мм.

Число слоев первичной обмотки однофазного однока-
тушечного или трехфазного трансформаторов (рис. 10, б
и в):

$$m_1 \approx \frac{W_1}{n_1}.$$

Полученное значение m_1 округляется до ближайшего большего целого числа.

В случае однофазного двухкатушечного трансформатора стержневого типа число витков на стержне будет (рис. 10, а):

$$\frac{W_1}{2}.$$

Толщина первичной обмотки:

$$\delta_1 = m_1 (d_{1и} + \gamma_1),$$

где γ_1 — толщина изоляционной прокладки между слоями. Изоляционные прокладки следует применять лишь при напряжении между слоями

свыше 50 в. Толщина изоляционных прокладок обычно не превышает 0,03—0,10 мм;

$d_{1н}$ — берется из позиции 5.

Число витков вторичной обмотки в одном слое:

$$n_2 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{2н}}.$$

Число слоев вторичной обмотки однофазного однокатушечного или трехфазного трансформаторов (рис. 10, б и в):

$$m_2 \approx \frac{W_2}{n_2}.$$

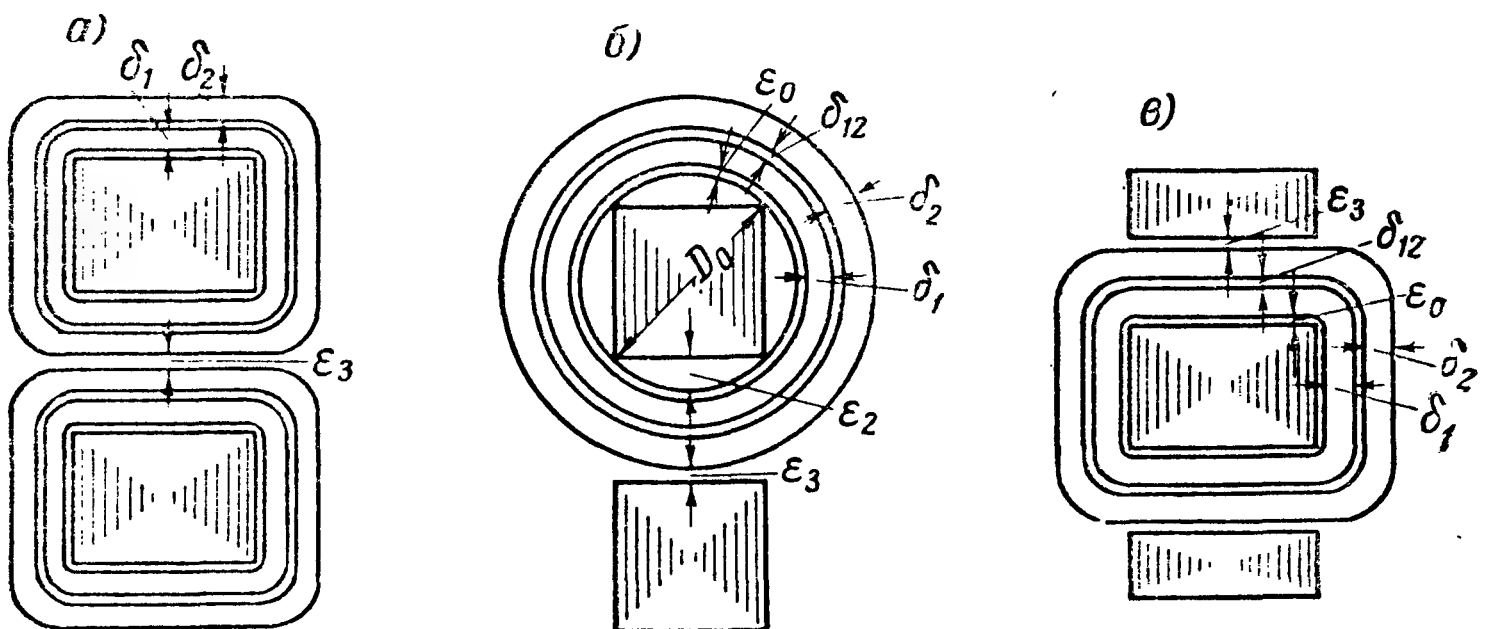


Рис. 10. Формы катушек маломощных двухобмоточных трансформаторов:

а — стержневого двухкатушечного;
б — стержневого однокатушечного; в — броневое.

Полученное значение m_2 также округляется до ближайшего бóльшего целого числа.

В однофазном двухкатушечном трансформаторе стержневого типа число витков на стержне $\frac{W_2}{2}$ (рис. 10, а).

Толщина вторичной обмотки:

$$\delta_2 = m_2 (d_{2н} + \gamma_2),$$

где $d_{2н}$ берется из позиции 5.

Ширина окна сердечника однофазного трансформатора с одной круглой катушкой (рис. 10, б):

$$b = \varepsilon_0 + \varepsilon_2 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2 + \varepsilon_3,$$

где $\varepsilon_2 = \frac{D_0 - a_c}{2}$ — зазор от стержня до катушки
(рис. 10, б);

$\varepsilon_0 = 1,0 \div 2,0$ — толщина изоляции между катушкой и стержнем, выполняемой обычно из электрокартона;

δ_{12} — толщина изоляции между обмотками, выполняемая обычно в маломощных трансформаторах из электрокартона и лакоткани толщиной 0,10—1,0 мм;

ε_3 — расстояние от катушки до второго стержня, принимаемое обычно в пределах $\varepsilon_3 = 3 \div 5$ мм;

δ_1 и δ_2 — толщина соответствующих обмоток, мм.

Ширина окна однофазного трансформатора с двумя круглыми катушками, а также трехфазного трансформатора с аналогичными катушками (рис. 10, а):

$$b = 2 (\varepsilon_0 + \varepsilon_2 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2) + \varepsilon_3.$$

Ширина окна однофазного трансформатора с одной прямоугольной катушкой (рис. 10, в):

$$b = k_2 (\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2) + \varepsilon_3,$$

где $k_2 = 1,2 \div 1,3$ — коэффициент увеличения толщины катушки за счет неплотностей прилегания слоев, в результате чего катушка приобретает овальный вид.

Ширина окна однофазного трансформатора с двумя прямоугольными катушками, а также трехфазного трансформатора с аналогичными катушками:

$$b = 2k_2 (\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2) + \varepsilon_3.$$

7. Вес меди и потери обмоток трансформатора

Вес меди обмоток трансформаторов определяется по следующим формулам:

а) однофазный трансформатор:

$$G_{M_1} = 8,9 W_1 q_1 l_{w1} \cdot 10^{-5} [\text{кг}];$$

$$G_{M_2} = 8,9 W_2 q_2 l_{w2} \cdot 10^{-5} [\text{кг}];$$

б) трехфазный трансформатор:

$$G_{M_1} = 3 \cdot 8,9 W_1 q_1 l_{w_1} \cdot 10^{-5} [\text{кг}];$$

$$G_{M_2} = 3 \cdot 8,9 W_2 q_2 l_{w_2} \cdot 10^{-5} [\text{кг}].$$

Полный вес меди обмоток:

$$G_M = G_{M_1} + G_{M_2} [\text{кг}],$$

где W_1 и W_2 берутся из позиции 4, q_1 и q_2 — из позиции 5;
 l_{w_1} — средняя длина витка обмотки в сантиметрах,
определяемая следующим образом:

а) в случае круглых катушек обмоток (рис. 10, б):

$$l_{w_1} = \pi (a_c \sqrt{2} + 2\varepsilon_0 + \delta_1) [\text{см}];$$

$$l_{w_2} = \pi (a_c \sqrt{2} + 2\varepsilon_0 + 2\delta_1 + 2\delta_{12} + \delta_2) [\text{см}];$$

б) в случае прямоугольных катушек обмоток
(рис. 10, а и в):

$$l_{w_1} = 2 (a_c + b_c + 4 \varepsilon_0 + 2 \delta_1) [\text{см}];$$

$$l_{w_2} = 2 [a_c + b_c + 4 (\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12}) + 2\delta_2] [\text{см}],$$

где a_c и b_c берутся из позиции 3, δ_1 и δ_2 — из позиции 6.

Потери в меди обмотки трансформатора определяются по следующей формуле:

$$P_M = 2,4 j^2 G_M [\text{вт}],$$

где j берется из позиции 2.

Потери в меди вычисляются для каждой обмотки трансформатора отдельно.

Суммарные потери в меди обмоток:

$$P_M = P_{M_1} + P_{M_2} [\text{вт}].$$

8. Вес стали и потери сердечника трансформатора

Вес стали сердечника трансформатора определяется по следующим формулам:

а) однофазный трансформатор стержневого типа
(рис. 1):

вес стержней

$$G_{cc} = 2 \cdot 7,7 H S_c \cdot 10^{-3} [\text{кг}];$$

вес ярем

$$G_{cy} = 2 \cdot 7,7 l_y S_y \cdot 10^{-3} [\text{кг}];$$

б) однофазный трансформатор броневого типа (рис. 2):

вес стержня

$$G_{cc} = 7,7 HS_c \cdot 10^{-3} \text{ [кг]};$$

вес ярем

$$G_{cя} = 2 \cdot 7,7 (H + l_{я}) S_{я} \cdot 10^{-3} \text{ [кг]};$$

в) трехфазный трансформатор (рис. 3):

вес стержней

$$G_{cc} = 3 \cdot 7,7 HS_c \cdot 10^{-3} \text{ [кг]};$$

вес ярем

$$G_{cя} = 2 \cdot 7,7 l_{я} S_{я} \cdot 10^{-3} \text{ [кг]}.$$

Полный вес сердечника трансформатора равен:

$$G_c = G_{cc} + G_{cя} \text{ [кг]},$$

где S_c , $S_{я}$, a_c и b_c берутся из позиции 3, H — из позиции 6.

Потери в стали стержней сердечника:

$$P_{cc} = k_c \left(\frac{B_c}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{cc} \text{ [вт]}.$$

Потери в стали ярем:

$$P_{cя} = k_c \left(\frac{B_{я}}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{cя} \text{ [вт]}.$$

Полные потери в стали сердечника:

$$P_c = P_{cc} + P_{cя} \text{ [вт]},$$

где B_c и $B_{я}$ берутся из позиции 2, k_c — из позиции 3.

9. Ток холостого хода трансформатора

Ток холостого хода трансформатора вычисляется по формуле

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{\mu}^2} \approx I_{\mu},$$

где I_{oa} — активная составляющая тока холостого хода;
 I_{μ} — реактивная составляющая его или намагничивающий ток.

Активная составляющая тока холостого хода зависит от потерь в стали сердечника и в меди первичной обмотки трансформатора от тока холостого хода. Она относительно мала по сравнению с намагничивающим током и ею при расчете тока холостого хода маломощного трансформатора практически можно пренебречь.

Намагничивающий ток здесь может быть определен по формуле

$$I_{\mu} = \frac{a\omega_c l'_c + a\omega_{\text{я}} l'_{\text{я}} + 0,8 \, n \, \delta_{\text{э}} \, B}{\sqrt{2W_1}} \quad [a],$$

где $\delta_{\text{э}} \approx 0,004 \text{ см}$ — величина эквивалентного воздушного зазора в сердечнике трансформатора;

n — число зазоров в сердечнике: в однофазном стержневом трансформаторе $n=4$ или 2, в однофазном броневом трансформаторе из штампованных листов $n=2$ или 1, в трехфазном трансформаторе $n=2$ или 1;

$a\omega_c$ и $a\omega_{\text{я}}$ — удельные м.д.с. в стержне и ярме трансформатора, определяемые по кривым рис. 12 соответственно индукциям B_c и $B_{\text{я}}$;

W_1 — число витков первичной обмотки из позиции 4;

l'_c — средняя длина пути магнитного потока в стержнях трансформатора:

а) для однофазного стержневого трансформатора (рис. 1)

$$l'_c = 2H \text{ [см]};$$

б) для однофазного броневое и трехфазного трансформаторов (рис. 2 и 3)

$$l'_c = H \text{ [см]};$$

$l'_{\text{я}}$ — средняя длина пути магнитного потока в ярмах трансформатора:

а) для однофазного стержневого трансформатора

$$l'_{\text{я}} = 2l_{\text{я}} \text{ [см]};$$

б) для однофазного броневое трансформатора

$$l'_{\text{я}} = H + l_{\text{я}} \text{ [см]};$$

в) для трехфазного трансформатора — крайняя фаза

$$l'_я = l_я \text{ [см];}$$

средняя фаза

$$l'_я = 0,$$

где H берется из позиции 6, $l_я$ — из рис. 1, 2 и 3.

Величина тока холостого трехфазного трансформатора определяется как среднее арифметическое из токов трех фаз.

10. Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора при номинальной нагрузке определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{P_2 \cos \varphi_2 + P_M + P_C} \cdot 100,$$

где P_2 и $\cos \varphi_2$ берутся из позиции 1, P_M — из позиции 7, P_C — из позиции 8.

11. Падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора

Относительные активные падения напряжения в первичной и вторичной обмотках однофазного трансформатора при номинальной нагрузке:

$$e_{a_1} [\%] = \frac{P_{M_1}}{U_1 I_1} \cdot 100;$$

$$e_{a_2} [\%] = \frac{P_{M_2}}{U_2 I_2} \cdot 100.$$

В случае трехфазного трансформатора нужно правые части этих формул разделить на $\sqrt{3}$.

Активные сопротивления обмоток однофазного трансформатора:

$$r_1 = \frac{P_{M_1}}{I_1^2} \text{ [ом]}, \quad r_2 = \frac{P_{M_2}}{I_2^2} \text{ [ом]}.$$

В случае трехфазного трансформатора нужно правые части этих формул разделить на 3 при соединении обмоток звездой.

Активное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора, приведенное к первой обмотке:

$$r_k = r_1 + r'_2 = r_1 + r_2 \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 [ом],$$

где U_1 и U_2 берутся из задания, I_1 и I_2 — из позиции 1, W_1 и W_2 — из позиции 4, P_{M_1} и P_{M_2} — из позиции 7.

Относительные индуктивные падения напряжения в отдельных обмотках двухобмоточного трансформатора:

$$e_{s_1} [‰] = \frac{4f \delta_{s_{12}} W_1 I_1 l_{w_1} \cdot 10^{-6}}{e_w H};$$

$$e_{s_2} [‰] = \frac{4f \delta_{s_{12}} W_2 I_2 l_{w_2} \cdot 10^{-6}}{e_w H};$$

$$e_s [‰] = e_{s_1} [‰] + e_{s_2} [‰].$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора, приведенное к первичной обмотке:

$$x_k = x_1 + x'_2 = \frac{e_s [\%] U_1}{100 I_1} [ом],$$

где

$$e_w = \frac{E_1}{W_1} [в/виток]; \quad \delta_{s_{12}} = \delta_{12} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} [см];$$

U_1 и f берутся из задания, I_1 и I_2 — из позиции 1, E_1 , W_1 и W_2 — из позиции 4, δ_1 , δ_2 , δ_{12} и H — из позиции 6, l_{w_1} и l_{w_2} — из позиции 7.

Полное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора:

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} [ом].$$

Напряжение короткого замыкания двухобмоточного трансформатора:

$$e_k [‰] = \frac{z_k I_1}{U_1} \cdot 100.$$

В случае трехфазного трансформатора нужно правую часть выражения для x_k поделить, а для $e_k [‰]$ — умножить на $\sqrt{3}$.

Относительное изменение напряжения двухобмоточного трансформатора при нагрузке может быть определено по следующей приближенной формуле:

$$\Delta U [\%] \approx e_{a1} [\%] \cos \varphi_1 + e_{a2} [\%] \cos \varphi_2 + e_{s1} [\%] \sin \varphi_1 + e_{s2} [\%] \sin \varphi_2,$$

где $\cos \varphi_2$ берется из задания, $\cos \varphi_1$ — из позиции 1.

12. Проверка трансформатора на нагревание

Превышение температуры обмоток и сердечника трансформатора над температурой окружающей среды приближенно можно определить по формуле:

$$\Theta \approx \frac{P_m + P_c}{\alpha_0 (S_{обм} + S_{сер})} + \Delta \Theta^\circ [^\circ\text{C}],$$

где P_m — суммарные потери в меди обмоток из позиции 7;

P_c — потери в стали сердечника из позиции 8;

$\alpha_0 = (10 \div 12) 10^{-4}$ — средний коэффициент теплоотдачи открытой поверхности обмоток и сердечника, *вт/см² · град*;

$S_{сер}$ и $S_{обм}$ — открытые поверхности сердечника и обмоток трансформатора, *см²*;

$\Delta \Theta^\circ$ — перепад температуры от внутренних слоев обмоток к наружным, который для пропитанных лаком обмоток приближенно может быть принят 10—15° С.

Пример расчета маломощного однофазного трансформатора

Задание:

число фаз — $m = 1$;

номинальная мощность вторичной обмотки — $P_2 = 50$ *ва*;

номинальные напряжения — $U_1 = 127$ *в*, $U_2 = 6$ *в*;

частота сети $f = 50$ *гц*;

коэффициент мощности нагрузки — $\cos \varphi_2 = 1$.

Примем конструкцию трансформатора броневого типа с сердечником из штампованных Ш-образных пластин из листовой электротехнической стали марки Э41 с толщиной листа $\delta_c = 0,5$ *мм* (ГОСТ 802-58).

1. Токи трансформатора:

$$I_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1} = \frac{50 \cdot 1}{127 \cdot 0,83 \cdot 0,88} = 0,54 \text{ а};$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{50}{6} = 8,3 \text{ а},$$

где приняты $\cos \varphi_1 = 0,88$ и $\eta = 0,83$ — по кривой рис. 9.

2. Примем значения индукции в стержне и плотности тока в проводах обмоток:

$$B_c = 12\,200 \text{ гс}; \quad j = 4,0 \text{ а/мм}^2.$$

3. Поперечное сечение стержня сердечника

$$S_c = C \sqrt{\frac{P_1 \alpha \cdot 10^6}{f B_c j}} = 0,7 \sqrt{\frac{68 \cdot 8,9 \cdot 10^6}{50 \cdot 12\,200 \cdot 4}} = 11,0 \text{ см}^2,$$

где

$$P_1 = U_1 I_1 = 127 \cdot 0,54 = 68 \text{ в а}; \quad \beta = 1,8;$$

$$\alpha = \frac{2,4}{k_c} \left(\frac{j}{B_c \cdot 10^{-4}} \right)^2 \frac{1}{\beta} = \frac{2,4}{1,6} \left(\frac{4}{1,22} \right)^2 \frac{1}{1,8} = 8,9;$$

$$S_{\text{я}} = \frac{S_c}{2} = \frac{11,0}{2} = 5,5 \text{ см}^2.$$

Принимаем Ш-образные пластины с размерами:

$$a_c = 2,4 \text{ см}; \quad b_c = \frac{S_c}{k_3 a_c} = \frac{11,0}{0,93 \cdot 2,4} = 4,9 \text{ см};$$

$$h_{\text{я}} = \frac{S_{\text{я}}}{k_3 b_c} = \frac{5,5}{0,93 \cdot 4,9} = 1,2 \text{ см}.$$

Для этих размеров из таблицы приложения II подходят пластины Ш — 24 × 48 со следующими данными:

$$a_c = 2,4 \text{ см}; \quad b_c = 4,8 \text{ см}; \quad h_{\text{я}} = 1,2 \text{ см}; \quad H = 3,6 \text{ см}; \\ b = 1,2 \text{ см}.$$

4. Число витков обмоток трансформатора: э.д.с. первичной и вторичной обмоток при нагрузке:

$$E_1 = U_1 - \frac{\Delta U [\%] U_1}{200} = 127 - \frac{12 \cdot 127}{200} = 120 \text{ в};$$

$$E_2 = U_2 + \frac{\Delta U [\%] U_2}{200} = 6 + \frac{12 \cdot 6}{200} \approx 6,4 \text{ в},$$

где по кривой рис. 9 принято $\Delta U \approx 12\%$.

Числа витков обмоток будут:

$$W_1 = \frac{E_1 \cdot 10^8}{4,44 f B_c S_c} = \frac{120 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 12 \cdot 200 \cdot 11,0} \approx 390;$$

$$W_2 = W_1 \frac{E_2}{E_1} = 390 \cdot \frac{6,4}{120} = 21.$$

5. Сечения и диаметры проводов обмоток:

$$q'_1 = \frac{I_1}{j'_1} = \frac{0,54}{4} = 0,135 \text{ мм}^2; q'_2 = \frac{I_2}{j'_2} = \frac{8,3}{4} = 2,08 \text{ мм}^2.$$

Ближайшие сечения и диаметры проводов по ГОСТ 2773-51 из приложения I:

$$q_1 = 0,132 \text{ мм}^2; d_1/d_{1н} = 0,41/0,45 \text{ мм};$$

$$q_2 = 2,06 \text{ мм}^2; d_2/d_{2н} = 1,62/1,70 \text{ мм};$$

марка проводов ПЭЛ.

Окончательные значения плотностей тока в проводах:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1} = \frac{0,54}{0,132} = 4,1 \text{ а/мм}^2;$$

$$j_2 = \frac{I_2}{q_2} = \frac{8,3}{2,06} = 4,0 \text{ а/мм}^2.$$

6. Высота окна сердечника трансформатора по позиции 3: $H = 3,6 \text{ см}$.

Проверка ширины окна сердечника трансформатора: число витков первичной обмотки в слое

$$n_1 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{1н}} = \frac{36 - 2 \cdot 3}{0,45} = 67;$$

число слоев этой обмотки

$$m_1 = \frac{W_1}{n_1} = \frac{390}{67} = 5,8 \approx 6,0;$$

толщина первичной обмотки

$$\delta_1 = m_1 d_{1н} = 6 \cdot 0,45 = 2,6 \text{ мм};$$

число витков вторичной обмотки в слое

$$n_2 = \frac{H - 2\varepsilon_1}{d_{2н}} = \frac{36 - 2 \cdot 3}{1,7} = 17;$$

число слоев этой обмотки

$$m_2 = \frac{W_2}{n_2} = \frac{21}{17} = 1,2 \approx 2;$$

$$\delta_2 = m_2 d_{2н} = 2 \cdot 1,70 = 3,4 \text{ мм};$$

ширина окна сердечника

$$b = k_2(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2) + \varepsilon_3 = 1,2 + \\ + (1,0 + 2,6 + 0,5 + 3,4) + 3 = 12 \text{ мм},$$

где принято: $k_2 = 1,2$; $\varepsilon_3 = 3 \text{ мм}$; $\varepsilon_0 = 1,0 \text{ мм}$; $\delta_{12} = 0,5$ — электрокартон.

7. Вес меди и потери обмоток трансформатора:
вес меди

$$G_{M_1} = 8,9 W_1 q_1 l_{w_1} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 390 \cdot 0,132 \cdot 15,4 \times \\ \times 10^{-5} = 0,070 \text{ кг};$$

$$l_{w_1} = 2(a_c + b_c + 4\varepsilon_0 + 2\delta_1) = 2(2,4 + 4,8 + 4 \times \\ \times 0,10 + 2 \cdot 0,26) = 15,4 \text{ см};$$

$$G_{M_2} = 8,9 W_2 q_2 l_{w_2} \cdot 10^{-5} = 8,9 \cdot 21 \cdot 2,06 \cdot 19,5 \cdot 10^{-5} = \\ = 0,075 \text{ кг};$$

$$l_{w_2} = [a_c + b_c + 4(\varepsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12}) + 2\delta_2] = 2 [2,4 + \\ + 4,8 + 4(0,10 + 0,26 + 0,05) + 2 \cdot 0,34] = 19,5 \text{ см};$$

$$G_M = G_{M_1} + G_{M_2} = 0,070 + 0,075 = 0,145 \text{ кг};$$

потери в меди обмоток

$$P_{M_1} = 2,4 j_1^2 G_{M_1} = 2,4 \cdot 4,1^2 \cdot 0,070 = 2,82 \text{ Вт};$$

$$P_{M_2} = 2,4 j_2^2 G_{M_2} = 2,4 \cdot 4,0^2 \cdot 0,075 = 2,87 \text{ Вт};$$

$$P_M = P_{M_1} + P_{M_2} = 2,82 + 2,87 \approx 5,80 \text{ Вт}.$$

8. Вес стали и потери сердечника трансформатора:
вес стали

$$G_{cc} = 7,7 H S_c \cdot 10^{-3} = 7,7 \cdot 3,6 \cdot 11,0 \cdot 10^{-3} = 0,310 \text{ кг};$$

$$G_{cя} = 2 \cdot 7,7 (H + l_{я}) S_{я} \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 7,7 (3,6 + \\ + 7,2) 5,5 \cdot 10^{-3} = 0,93 \text{ кг};$$

$$l_{я} = 2b + a_c + 2h_{я} = 2 \cdot 1,2 + 2,4 + 2 \cdot 1,2 = 7,2 \text{ см};$$

$$G_c = G_{cc} + G_{cя} = 0,310 + 0,93 = 1,24 \text{ кг};$$

потери в стали

$$P_{cc} = k_c \left(\frac{B_c}{10\,000} \right)^2 \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{cc} =$$

$$= 1,6 \left(\frac{12\,200}{10\,000} \right)^2 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} 0,31 = 0,76 \text{ вт};$$

$$P_{\text{ср}} = k_c \left(\frac{B_{\text{я}}}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{f}{50} \right)^{1,3} G_{\text{ср}} =$$

$$= 1,6 \left(\frac{12\,200}{10\,000} \right)^2 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,3} 0,93 = 2,23 \text{ вт};$$

$$P_c = P_{\text{ср}} + P_{\text{ср}} = 0,76 + 2,23 \approx 3,0 \text{ вт}.$$

9. Ток холостого хода трансформатора:

$$I_0 \approx I_{\mu} = \frac{a\omega_c l'_c + a\omega_{\text{я}} l'_{\text{я}} + 0,8n\delta_3 B}{\sqrt{2} W_1} =$$

$$= \frac{6,5 \cdot 3,6 + 6,5 \cdot 10,8 + 0,8 \cdot 2 \cdot 0,004 \cdot 12\,200}{\sqrt{2} \cdot 390} = 0,31 \text{ а},$$

где

$$l'_c = H = 3,6 \text{ см}; B_c = B_{\text{я}} = 12\,200 \text{ гс}; a\omega_c =$$

$$= a\omega_{\text{я}} = 6,5,$$

по кривой рис. 12 для стали марки Э41;

$$l'_{\text{я}} = H + l_{\text{я}} = 3,6 + 7,2 = 10,8 \text{ см}.$$

10. Коэффициент полезного действия трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{P_2 \cos \varphi_2 + P_{\text{м}} + P_c} \cdot 100 = \frac{50 \cdot 1}{50 \cdot 1 + 5,80 + 3,0} \times$$

$$\times 100 \approx 85\%.$$

11. Падения напряжения и сопротивления обмоток трансформатора: относительные активные падения напряжения в обмотках:

$$e_{a_1} [\%] = \frac{P_{\text{м}_1}}{U_1 I_1} \cdot 100 = \frac{2,82}{127 \cdot 0,54} 100 = 4,1\%;$$

$$e_{a_2} [\%] = \frac{P_{\text{м}_2}}{U_2 I_2} \cdot 100 = \frac{2,87}{6 \cdot 8,3} 100 = 5,7\%;$$

активные сопротивления обмоток

$$r_1 = \frac{P_{M_1}}{I_1^2} = \frac{2,82}{0,54^2} = 9,7 \text{ ом}; \quad r_2 = \frac{P_{M_2}}{I_2^2} =$$

$$= \frac{2,87}{8,3^2} = 0,0416 \text{ ом};$$

$$r_k = r_1 + r_2' = 9,7 + 0,0416 \left(\frac{390}{21} \right)^2 = 24,0 \text{ ом};$$

относительные индуктивные падения напряжения в обмотках

$$e_{s_1} [\%] = \frac{4f \delta_{s_{12}} W_1 I_1 l_{w_1} \cdot 10^{-6}}{e_w H} =$$

$$= \frac{4 \cdot 50 \cdot 0,25 \cdot 0,54 \cdot 390 \cdot 15,4 \cdot 10^{-6}}{0,307 \cdot 3,6} = 0,147\%;$$

$$e_{s_2} [\%] = \frac{4f \delta_{s_{12}} W_2 I_2 \cdot l_{w_2} \cdot 10^{-6}}{e_w H} =$$

$$= \frac{4 \cdot 50 \cdot 0,25 \cdot 8,3 \cdot 21 \cdot 19,5 \cdot 10^{-6}}{0,307 \cdot 3,6} = 0,153\%;$$

$$e_s [\%] = e_{s_1} [\%] + e_{s_2} [\%] = 0,147 + 0,153 = 0,30\%;$$

$$e_w = \frac{E_1}{W_1} = \frac{120}{390} = 0,307 \text{ в/виток}; \quad \delta_{s_{12}} = \delta_{12} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} =$$

$$= 0,5 + \frac{0,26 + 0,34}{3} = 0,25 \text{ см};$$

индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x_k = x_1 + x_2' = \frac{e_s [\%] U_1}{100 I_1} = \frac{0,30 \cdot 127}{100 \cdot 0,54} = 0,70 \text{ ом}.$$

Полное сопротивление и напряжение короткого замыкания трансформатора:

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = \sqrt{24^2 + 0,7^2} \approx 24 \text{ ом};$$

$$e_k [\%] = \frac{z_k I_1}{U_1} \cdot 100 = \frac{24 \cdot 0,54}{127} 100 = 10\%.$$

Относительное изменение напряжения трансформатора при нагрузке:

$$\Delta U [\%] \approx e_{a1} [\%] \cos \varphi_1 + e_{a2} [\%] \cos \varphi_2 + e_{s1} [\%] \sin \varphi_1 + e_{s2} [\%] \sin \varphi_2 = 4,1 \cdot 0,88 + 5,7 \cdot 1 + 0,147 \cdot 0,5 + 0 \approx 9,4 \%$$

12. Проверка трансформатора на нагревание:

$$\Theta = \frac{P_M + P_c}{\alpha_0 (S_{сер} + S_{обм})} + \Delta \Theta = \frac{5,8 + 3,0}{10 \cdot 10^{-4} (180 + 74)} + 15 = 50^\circ \text{C},$$

где

$$S_{обм} \approx 2H [a_c + b_c + 4(\epsilon_0 + \delta_1 + \delta_{12} + \delta_2)] = 2 \cdot 3,6 [2,4 + 4,8 + 4(0,10 + 0,26 + 0,05 + 0,34)] \approx 74 \text{ см}^2;$$

$$S_{сер} \approx 2l_{я} (b_c + 2h_{я}) + 2H (b_c + 2h_{я}) + 4b_c h_{я} = 2 \cdot 7,2 (4,8 + 2 \cdot 1,2) + 2 \cdot 3,6 (4,8 + 2 \cdot 1,2) + 4 \cdot 4,8 \cdot 1,2 \approx 180 \text{ см}^2.$$

ГЛАВА ВТОРАЯ

МАЛОМОЩНЫЕ СИЛОВЫЕ АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Автотрансформатор отличается от трансформатора тем, что он имеет одну обмотку, часть которой одновре-

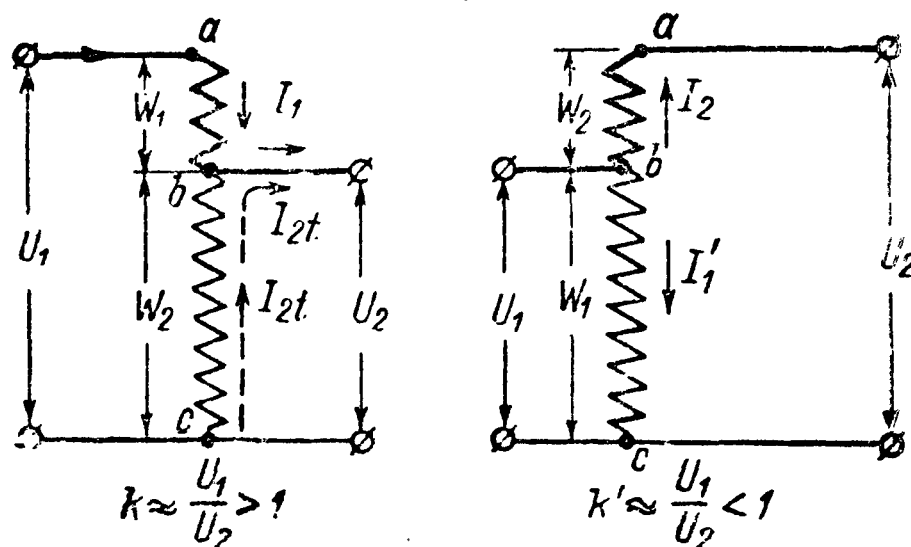


Рис. 11. Схемы автотрансформатора.

менно принадлежит первичной и вторичной цепям (рис. 11). Ввиду этого передача мощности в автотранс-

форматоре из первичной цепи во вторичную происходит электрическим и магнитным путями. В конструктивном отношении различия между автотрансформатором и трансформатором практически не существует.

Автотрансформатор выгодно применять в том случае, когда коэффициент трансформации близок к единице, так как в этом случае расчетная мощность его мала по сравнению с заданной мощностью, а следовательно, размеры, вес, стоимость и потери его значительно меньше аналогичных данных трансформатора той же мощности. Автотрансформаторы часто выполняются с секционированной обмоткой, что позволяет использовать их для подбора и регулирования напряжения различных устройств.

Расчет маломощных автотрансформаторов мало отличается от изложенного выше расчета маломощных трансформаторов.

УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ ОДНОФАЗНЫХ АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

Исходными данными для расчета маломощных силовых автотрансформаторов являются следующие величины:

номинальная мощность вторичной цепи — P_2 [ва];

номинальные напряжения — U_1 и U_2 [в];

частота сети — f [гц].

Коэффициент мощности нагрузки — $\cos \varphi_2$.

1. Расчетная мощность и токи автотрансформатора

Как указывалось выше, мощность во вторичную цепь автотрансформатора передается магнитным и электрическим путями. Основные же размеры автотрансформатора определяются величиной мощности P_{2t} , передаваемой во вторичную цепь магнитным путем. Величина этой расчетной мощности будет:

$P_{2t} \approx P_2 \left(\frac{k-1}{k} \right)$ — в случае понижающего автотрансформатора, когда

$$k = \frac{W_1 + W_2}{W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} > 1;$$

$P_{2t} \approx P_2 (1 - k')$ — в случае повышающего автотрансформатора, когда

$$k' = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \approx \frac{U_1}{U_2} < 1,$$

где

$P_2 = U_2 I_2$ — мощность вторичной цепи в вольтамперах по заданию;

W_1 и W_2 — числа витков отдельных частей обмоток (рис. 11).

Величины токов первичной и вторичной цепей однофазного автотрансформатора определяются по формулам:

$$I_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1} [a]; \quad I_2 = \frac{P_2}{U_2} [a],$$

где U_1 , U_2 , P_2 и $\cos \varphi_2$ берутся из задания;

η — предварительное значение к.п.д. автотрансформатора, определяемое по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \left(\frac{1 - \eta_{2t}}{\eta_{2t}} \right) P_{2t}};$$

η_2 — к. п. д. трансформатора мощностью, равной расчетной мощности автотрансформатора P_2 , ориентировочно выбираемый по кривой рис. 9;

$\cos \varphi_1$ — коэффициент мощности первичной цепи, определяемый, как и в маломощных трансформаторах, по позиции 1 главы первой.

2. Выбор индукции в стержне сердечника и плотности тока в проводах обмотки автотрансформатора

Выбор величины индукции в стержне сердечника и плотности тока в проводах обмотки маломощного автотрансформатора производится так же, как и в маломощных трансформаторах, по позициям 2 и 3 главы первой.

3. Определение поперечного сечения стержня и ярма сердечника автотрансформатора

Определение поперечных сечений стержня S_c и ярма S_y сердечника автотрансформатора производится так же, как и в маломощных трансформаторах, по позиции 4 главы первой, с тем отличием, что в формулу для определения сечения стержня S_c вместо P_1 ставится расчетная мощность P_{2t} и коэффициент C в формуле должен быть увеличен на 15—20%.

4. Определение числа витков обмотки автотрансформатора

В маломощных автотрансформаторах величина падения напряжения в обмотке при нагрузке меньше, чем в аналогичных трансформаторах, примерно в отношении $\frac{P_{2t}}{P_2}$, поэтому при определении числа витков обмотки автотрансформатора можно без большой погрешности пренебречь падением напряжения в ней и вычислять их по формулам:

а) понижающий автотрансформатор (рис. 11):

$$k = \frac{U_1}{U_2} > 1;$$

$$W'_1 = (W_1 + W_2) = \frac{U_1 \cdot 10^8}{4,44f B_c S_c};$$

$$e_w = \frac{U_1}{W_1 + W_2} \text{ [в/виток]};$$

$$W_2 = \frac{U_2}{e_w}; \quad W_1 = W'_1 - W_2;$$

б) повышающий автотрансформатор (рис. 11):

$$k' = \frac{U_1}{U_2} < 1;$$

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot 10^8}{4,44f B_c S_c};$$

$$e_w = \frac{U_1}{W_1} \text{ [в/виток]};$$

$$W_2 = \frac{U_2 - U_1}{e_w},$$

где U_1 , U_2 и f берутся из задания, B_c — из позиции 2, S_c — из позиции 3.

5. Определение сечения и диаметра провода обмотки

Предварительные значения поперечных сечений проводов отдельных участков обмотки автотрансформатора определяются по формулам (рис. 11):

а) понижающий автотрансформатор, $k = \frac{U_1}{U_2} > 1$:

$$q'_{ab} = \frac{I_1}{j'_{ab}} \text{ [мм}^2\text{]}; \quad q'_{bc} = \frac{I_1 - I_2}{j'_{bc}} \text{ [мм}^2\text{]};$$

б) повышающий автотрансформатор, $k' = \frac{U_1}{U_2} < 1$:

$$q'_{ab} = \frac{I_2}{j'_{ab}} \text{ [мм}^2\text{]}; \quad q'_{bc} = \frac{I_1 - I_2}{j'_{bc}} \text{ [мм}^2\text{]},$$

где I_1 и I_2 берутся из позиции 1, j'_{ab} и j'_{bc} — из позиции 2.

Окончательные значения поперечных сечений и диаметров проводов выбираются по ближайшим данным ГОСТ из приложения I:

$$\begin{aligned} q'_{ab} &= \dots \text{ мм}^2; \quad d_{ab}/d_{ab_{н}} = \dots \text{ мм}; \quad q_{bc} = \\ &= \dots \text{ мм}^2; \quad d_{bc}/d_{bc_{н}} = \dots \text{ мм}. \end{aligned}$$

6. Определение размеров окна сердечника и укладка обмотки на стержнях автотрансформатора

Определение размеров окна сердечника автотрансформатора и укладка обмотки на стержнях его производится так же, как и в маломощных трансформаторах, по позиции 6 главы первой.

7. Вес меди и потери обмотки автотрансформатора

Вес меди обмотки автотрансформатора определяется для каждого участка ее раздельно по следующим формулам (рис. 11):

а) понижающий автотрансформатор, $k = \frac{U_1}{U_2} > 1$:

$$G_{\text{mab}} = 8,9 W_1 q_{ab} l_{wab} \cdot 10^{-5} [\text{кг}];$$

$$G_{\text{mbc}} = 8,9 W_2 q_{bc} l_{wbc} \cdot 10^{-5} [\text{кг}];$$

б) повышающий автотрансформатор, $k' = \frac{U_1}{U_2} < 1$:

$$G_{\text{mab}} = 8,9 W_2 q_{ab} l_{wab} \cdot 10^{-5} [\text{кг}];$$

$$G_{\text{mbc}} = 8,9 W_1 q_{bc} l_{wbc} \cdot 10^{-5} [\text{кг}].$$

Полный вес меди обмотки равен:

$$G_{\text{м}} = G_{\text{mab}} + G_{\text{mbc}} [\text{кг}],$$

где W_1 и W_2 берутся из позиции 4, q_{ab} и q_{bc} — из позиции 5, l_{wab} и l_{wbc} вычисляются по формулам позиции 7 главы первой.

Потери в меди обмотки автотрансформатора при нагрузке и 75°C определяются раздельно для каждого участка обмотки (рис. 11):

$$P_{\text{mab}} = 2,4 j_{ab}^2 \cdot G_{\text{mab}} [\text{вт}],$$

$$P_{\text{mbc}} = 2,4 j_{bc}^2 \cdot G_{\text{mbc}} [\text{вт}].$$

Суммарные потери в меди обмотки:

$$P_{\text{м}} = P_{\text{mab}} + P_{\text{mbc}} [\text{вт}].$$

8. Вес стали и потери сердечника автотрансформатора

Определение веса стали и потерь в сердечнике автотрансформатора производится так же, как и для мало-мощного трансформатора, по позиции 8 главы первой.

9. Ток холостого хода автотрансформатора

Определение тока холостого хода автотрансформатора производится так же, как и мало-мощного трансформатора, по позиции 9 главы первой.

10. Коэффициент полезного действия и изменение напряжения автотрансформатора при нагрузке

Величина к.п.д. автотрансформатора определяется так же, как и маломощного трансформатора, по позиции 10 главы первой.

При определении относительного изменения напряжения автотрансформатора при нагрузке индуктивной составляющей падения напряжения в обмотке его практически можно пренебречь как малой величиной по сравнению с активной. Поэтому для изменения напряжения автотрансформатора можно написать:

$$\Delta U [\%] \approx e_a [\%] \cos \varphi_1,$$

где $e_a [\%] = \frac{P_m}{P_2} \cdot 100$; P_2 берется из задания, $\cos \varphi_1$ — из позиции 1, P_m — из позиции 7.

11. Проверка автотрансформатора на нагревание

Проверка автотрансформатора на нагревание производится так же, как и маломощного трансформатора, по позиции 12 главы первой.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПЕРЕСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ РЕМОНТЕ И ПЕРЕМОТКЕ ИХ

Как известно, при эксплуатации электро- и радиооборудования в условиях многочисленных промышленных предприятий, различного рода общих и специальных установок, домашнего быта и других областях его применения — элементы этого оборудования периодически выходят из строя и требуют соответствующего ремонта или необходимой переделки. К числу этих элементов данного оборудования относятся, например, различные маломощные силовые однофазные и трехфазные трансформаторы.

При ремонте таких трансформаторов на электроремонтных заводах или в мастерских обычно приходится заменять старую обмотку полностью или частично но-

вой путем перемотки ее вручную или на станке. При этом часто возникает необходимость в переделке трансформатора на другие технические данные.

ПЕРЕСЧЕТ МАЛОМОЩНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НА ДРУГИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

При пересчете маломощных силовых однофазных и трехфазных трансформаторов на другие технические данные обычно в распоряжении пересчитывающего трансформатор имеются тип и геометрические размеры сердечника последнего и в большинстве случаев известны также числа витков старых обмоток и напряжения на их зажимах.

Таким образом, при переделке вышедшего из строя трансформатора на другие технические данные обычно известны следующие величины (рис. 1, 2 и 3):

$$a_c = \dots \text{ см}; \quad b_c = \dots \text{ см}; \quad h_{\text{я}} = \dots \text{ см}; \quad H = \dots \text{ см}; \quad b = \dots \text{ см}; \quad W_1 = \dots; \quad W_2 = \dots; \quad U_1 = \dots \text{ в}; \quad U_2 = \dots \text{ в}; \\ P_2 = \dots \text{ в а}; \quad f = \dots \text{ гц}; \quad q_1 = \dots \text{ мм}^2; \quad d_1/d_{1н} = \dots \text{ мм}; \\ q_2 = \dots \text{ мм}^2; \quad d_2/d_{2н} = \dots \text{ мм}.$$

Пусть требуется пересчитать маломощный трансформатор с известными паспортными данными полезной мощности, напряжений и частоты P_2 , U_1 , U_2 и f и с числами витков и с сечениями проводников первичной и вторичной обмоток W_1 , W_2 , q_1 и q_2 на новые технические данные мощности и напряжений той же частоты.

В целях сохранения приблизительно прежних значений тока холостого хода и магнитных потерь в стали сердечника трансформатора при пересчете последнего на другие технические данные — магнитный поток или индукция в сердечнике трансформатора должны остаться по возможности неизменными. Для этого достаточно сохранить неизменным число вольт, приходящееся на один виток обмоток трансформатора $e\omega = \frac{U_1}{W_1}$. Однако при пересчете трансформатора на несколько бóльшую мощность это условие не всегда выполнимо.

Вместе с этим для сохранения прежнего нагрева трансформатора при новой мощности потери в меди новых обмоток трансформатора не должны превышать по-

терь в старых обмотках его. В этом случае при новой мощности трансформатора $P_2' > P_2$ для выполнения указанного условия нужно, чтобы при неизменной плотности тока в обмотках вес меди новых обмоток его G_m' равнялся весу меди старых обмоток G_m по условию равенства потерь

$$P_m = 2,4j^2 G_m = 2,4j'^2 G_m'.$$

1. Токи в обмотках трансформатора по паспортным данным:

а) однофазный трансформатор:

$$I_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{U_1 \eta \cos \varphi_1} [a]; \quad I_2 = \frac{P_2}{U_2} [a];$$

б) трехфазный трансформатор:

$$I_1 = \frac{P_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} U_1 \eta \cos \varphi_1} [a]; \quad I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_2} [a],$$

где в первом приближении можно принять:

$$\cos \varphi_2 = 1; \quad \eta \cos \varphi_2 = 0,7 \div 0,8;$$

U_1 , U_2 и P_2 берутся по паспорту трансформатора.

2. Плотности тока в обмотках трансформатора:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1} [a/mm^2]; \quad j_2 = \frac{I_2}{q_2} [a/mm^2];$$

в среднем

$$j = \sqrt{j_1 j_2} [a/mm^2],$$

где I_1 и I_2 берутся из позиции 1, q_1 и q_2 — сечения проводов старых обмоток трансформатора.

3. Новые токи и потребляемая мощность трансформатора:

а) однофазный трансформатор:

$$I_1' \approx I_1 \frac{P_2'}{P_2} \cdot \frac{U_1}{U_1'} [a]; \quad I_2' = I_2 \frac{P_2'}{P_2} \cdot \frac{U_2}{U_2'} [a];$$

$$P_1' = U_1' I_1' [ва];$$

б) трехфазный трансформатор:

I_1' и I_2' — то же, что и в а);

$$P_1' = \sqrt{3} U_1' I_1' [ва],$$

где U_1 , U_2 и P_2 берутся по паспорту трансформатора, I_1 и I_2 — из позиции 1; U'_1 , U'_2 и P'_2 — новые значения по заданию.

4. Поперечные сечения стержня и ярма сердечника трансформатора:

$$S_c = k_3 a_c b_c \text{ [см}^2\text{]}, S_y = k_3 b_c h_y \text{ [см}^2\text{]},$$

где в среднем коэффициент заполнения сечения сталью можно принять: $k_3 \approx 0,9$; a_c , b_c и h_y — геометрические размеры трансформатора (рис. 1, 2 и 3).

5. Число вольт, приходящееся на один виток старых обмоток трансформатора:

$$e_w = \frac{U_1}{w_1} \text{ [в/виток]},$$

где U_1 и W_1 — первичное напряжение и число витков первичной обмотки исходного трансформатора.

В случае трехфазного трансформатора нужно в указанное выражение для e_w подставить $\frac{U_1}{\sqrt{3}}$.

6. Проверка величины индукции в стержне сердечника трансформатора:

$$B_c \approx \frac{U_1 \cdot 10^8}{4,44 f W_1 S_c} \leq 12\,000 \div 13\,000 \text{ гс},$$

где U_1 , f и W_1 — данные исходного трансформатора; S_c берется из позиции 4.

В случае трехфазного трансформатора нужно в указанное выражение для B_c подставить $\frac{U_1}{\sqrt{3}}$.

7. Полный вес меди обмоток трансформатора $G_m = G_{m_1} + G_{m_2}$ вычисляется по формулам позиции 7 главы первой в зависимости от типа трансформатора или определяется взвешиванием на весах старых обмоток.

8. Полный вес стали сердечника трансформатора $G_c = G_{cc} + G_{cy}$ вычисляется по формулам позиции 8 главы первой в зависимости от типа трансформатора или определяется взвешиванием сердечника на весах.

9. Отношение веса стали сердечника к весу меди обмоток трансформатора:

$$\alpha = \frac{G_c}{G_m},$$

где G_m берется из позиции 7, G_c — из позиции 8.

10. Произведение индукции в стержне на среднюю плотность тока в обмотках на основании формулы позиции 3 главы первой будет:

$$B_c j = C' \frac{\alpha P_1' \cdot 10^6}{f S_c^2},$$

где f берется по заданию, P_1' — из позиции 3, S_c — из позиции 4, α — из позиции 9.

Коэффициент C' в среднем можно принять:

для однофазных трансформаторов $C' \approx 0.40$;

для трехфазных трансформаторов $C' \approx 0.15$.

При выборе отдельных величин B_c и j по указанному произведению следует руководствоваться данными позиций 2 и 6 этой главы, чтобы они не превышали значительно указанные в этих позициях величины; окончательно принимается:

$$B_c = \dots \text{ гс}; \quad j = \dots \text{ а/мм}^2.$$

11. Число вольт, приходящееся на один виток новых обмоток трансформатора:

$$e'_{w'} = 4,44 f B_c S_c \cdot 10^{-8} \text{ [в/виток]},$$

где f берется по заданию, S_c — из позиции 4, B_c — из позиции 10.

12. Числа витков новых обмоток трансформатора:

а) однофазный трансформатор

$$W_1' = \frac{U_1'}{e'_{w'}}; \quad W_2' = W_1' \frac{U_2'}{U_1'};$$

б) трехфазный трансформатор

$$W_1' = \frac{U_1'}{\sqrt{3} e'_{w'}}, \quad W_1' = W_1' \frac{U_2'}{U_1'},$$

где U_1' и U_2' берутся по заданию, $e'_{w'}$ — из позиции 11.

13. Сечение и диаметр проводов новых обмоток трансформатора:

$$q_1' = \frac{I_1'}{j_1} \text{ [мм}^2\text{]}; \quad q_2' = \frac{I_2'}{j_2} \text{ [мм}^2\text{]},$$

где j_1 и j_2 берутся из позиции 2, I'_1 и I'_2 — из позиции 3.

Окончательные значения поперечных сечений и диаметров проводов выбираются по ближайшим данным ГОСТ из приложения I:

$$\begin{aligned} q'_1 &= \dots \text{ мм}^2; d'_1/d'_{1н} = \dots \text{ мм}; \\ q'_2 &= \dots \text{ мм}^2; d'_2/d'_{2н} = \dots \text{ мм}. \end{aligned}$$

14. Укладка обмоток на стержнях сердечника трансформатора производится так же, как показано в позиции 6 главы первой.

Для определения других данных трансформатора, как, например, тока холостого хода, к. п. д., падения напряжения и сопротивлений обмоток его можно воспользоваться позициями 9, 10 и 11 главы первой.

Пример пересчета мало мощного однофазного трансформатора на другие технические данные

Пусть в электроремонтные мастерские поступил в ремонт и на перемотку поврежденный однофазный трансформатор броневого типа с паспортными данными $P_2 = 100 \text{ в}а$, $U_1 = 127 \text{ в}$, $U_2 = 6 \text{ в}$ и $f = 50 \text{ гц}$, со следующими геометрическими и обмоточными данными:

$$\begin{aligned} a_c &= 3 \text{ см}; b_c = 4,5 \text{ см}; h_{я} = 1,5 \text{ см}; H = 3,5 \text{ см}; \\ b &= 1,5 \text{ см}; \end{aligned}$$

$$W_1 = 380; W_2 = 18; q_1 = 0,273 \text{ мм}^2;$$

$$d_1/d_{1н} = 0,59/0,64 \text{ мм};$$

$$q_2 = 4,65 \text{ мм}^2; d_2/d_{2н} = 2,44/2,52 \text{ мм};$$

марка проводов ПЭЛ.

Пусть, например, требуется пересчитать и перемотать данный трансформатор на мощность $P'_2 = 125 \text{ в}а$, напряжения $U'_1 = 220 \text{ в}$, $U'_2 = 400 \text{ в}$ и частоту $f = 50 \text{ гц}$.

1. Токи в обмотках трансформатора по паспортным данным:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{P_2 \cos \varphi_2}{U_2 \eta \cos \varphi_2} = \frac{100 \cdot 1}{127 \cdot 0,76} \approx 1,04 \text{ а}, \quad I_2 = \frac{P_2}{U_2} = \frac{100}{6} = \\ &= 16,7 \text{ а}, \end{aligned}$$

где принято:

$$\eta \cos \varphi_1 = 0,76; \cos \varphi_2 = 1.$$

2. Плотности тока в обмотках:

$$j_1 = \frac{I_1}{q_1} = \frac{1,04}{0,273} = 3,8 \text{ а/мм}^2; j_2 = \frac{I_2}{q_2} = \frac{16,7}{4,65} = 3,6 \text{ а/мм}^2;$$
$$j = \sqrt{j_1 j_2} = \sqrt{3,8 \cdot 3,6} = 3,7 \text{ а/мм}^2.$$

3. Новые токи и потребляемая мощность трансформатора:

$$I'_1 \approx I_1 \frac{P'_2}{P_2} \cdot \frac{U_1}{U'_1} = 1,04 \frac{125}{100} \cdot \frac{127}{220} = 0,75 \text{ а};$$

$$I'_2 = I_2 \frac{P'_2}{P_2} \cdot \frac{U_2}{U'_2} = 16,7 \frac{125}{100} \cdot \frac{6}{400} = 0,31 \text{ а};$$

$$P'_1 = U'_1 I'_1 = 220 \cdot 0,75 = 165 \text{ в а}.$$

4. Поперечное сечение стержня сердечника трансформатора:

$$S_c = k_3 a_c b_c = 0,9 \cdot 3 \cdot 4,5 = 12,2 \text{ см}^2.$$

5. Число вольт, приходящееся на один виток старых обмоток трансформатора:

$$e_w = \frac{U_1}{W_1} = \frac{127}{380} = 0,334 \text{ в/виток}.$$

6. Проверка величины индукции в стержне сердечника:

$$B_c \approx \frac{U_1 \cdot 10^8}{4,44 f W_1 S_c} = \frac{127 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 380 \cdot 12,2} = 12\,300 \text{ гс}.$$

7. Веса меди обмоток и сердечника трансформатора по взвешиванию на весах:

$$G_m = 0,30 \text{ кг}; G_c = 1,8 \text{ кг}.$$

8. Отношение веса стали к весу меди:

$$\alpha = \frac{G_c}{G_m} = \frac{1,8}{0,3} = 6,0.$$

9. Произведение индукции в стержне на среднюю плотность тока в обмотках:

$$B_c j = C' \frac{\alpha P'_1 \cdot 10^6}{f S_c^2} = 0,4 \frac{6,0 \cdot 165 \cdot 10^6}{50 \cdot 12,2^2} = 5,3 \cdot 10^4;$$

примем окончательно:

$$B_c = 13\,500 \text{ гс}; \quad j = 3,9 \text{ а/мм}^2.$$

10. Число вольт, приходящееся на один виток новых обмоток трансформатора:

$$e'_{w} = 4,44 f B_c S'_c \cdot 10^{-8} = 4,44 \cdot 50 \cdot 13\,500 \times \\ \times 12,2 \cdot 10^{-8} = 0,366 \text{ в/виток}.$$

11. Числа витков новых обмоток:

$$W'_1 = \frac{U'_1}{e'_{w1}} = \frac{220}{0,366} = 600; \quad W'_2 = W'_1 \frac{U'_2}{U'_1} = 600 \cdot \frac{400}{220} = \\ = 1090.$$

12. Сечение и диаметр проводов новых обмоток:

$$q'_1 = \frac{I'_1}{i_1} = \frac{0,75}{3,9} = 0,192 \text{ мм}^2; \quad q'_2 = \frac{I'_2}{i_2} = \frac{0,31}{3,9} = \\ = 0,0795 \text{ мм}^2.$$

Ближайшие размеры проводов по ГОСТ 7262-54 из приложения I:

$$q'_1 = 0,188 \text{ мм}^2; \quad d'_1/d'_{1н} = 0,49/0,55 \text{ мм}; \quad q'_2 = 0,0754 \text{ мм}^2; \\ d'_2/d'_{2н} = 0,31/0,36 \text{ мм};$$

марка проводов ПЭВ-2.

13. Проверка возможности укладки новых обмоток в окне сердечника трансформатора:

а) коэффициент заполнения медью окна сердечника при старых обмотках

$$k_0 = \frac{q_1 W_1 + q_2 W_2}{b H} = \frac{0,273 \cdot 380 + 4,65 \cdot 18}{15 \cdot 35} = 0,36;$$

б) то же, при новых обмотках

$$k'_0 = \frac{q'_1 W'_1 + q'_2 W'_2}{b H} = \frac{0,188 \cdot 600 + 0,0754 \cdot 1090}{15 \cdot 35} = 0,37.$$

Так как эти коэффициенты получились приблизительно одинаковыми, то укладка новых обмоток на стержне сердечника трансформатора возможна.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

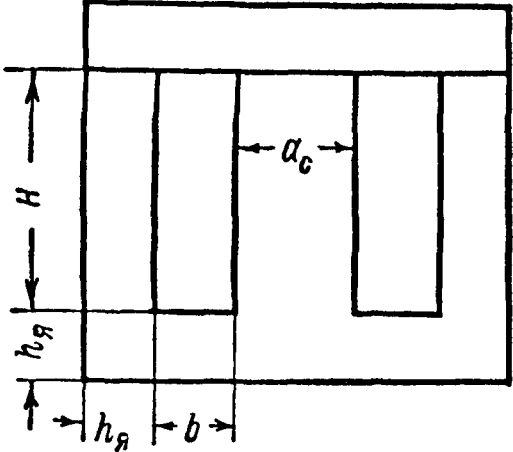
РАЗМЕРЫ КРУГЛЫХ МЕДНЫХ ОБМОТОЧНЫХ ПРОВОДОВ
по ГОСТ 2773-51, 6324-52 и 7262-54

Диаметр голого провода, <i>мм</i>	Сечение голого провода, <i>мм²</i>	Диаметр провода с изоляцией, <i>мм</i>			
		ГОСТ 2773-51	ГОСТ 7262-54	ГОСТ 6324-52	
		ПЭЛ и ПЭТ	ПЭВ 2	ПЭЛШО и ПЭЛШКО	ПБД
0,05	0,00196	0,065	0,08	0,12	—
0,06	0,00283	0,075	0,09	0,13	—
0,07	0,00345	0,085	0,10	0,14	—
0,08	0,00502	0,095	0,11	0,15	—
0,09	0,00686	0,105	0,12	0,16	—
0,10	0,00785	0,120	0,13	0,175	—
0,11	0,00950	0,130	0,14	0,185	—
0,12	0,0113	0,140	0,15	0,195	—
0,13	0,0132	0,150	0,16	0,205	—
0,14	0,0154	0,160	0,17	0,215	—
0,15	0,0176	0,170	0,19	0,225	—
0,16	0,0201	0,180	0,20	0,235	—
0,17	0,0227	0,190	0,21	0,245	—
0,18	0,0254	0,200	0,22	0,255	—
0,19	0,0283	0,210	0,23	0,265	—
0,20	0,0314	0,225	0,24	0,290	0,39
0,21	0,0346	0,235	0,25	0,300	0,40
0,23	0,0415	0,255	0,28	0,320	0,42
0,25	0,0440	0,275	0,30	0,340	0,44
0,27	0,0572	0,305	0,32	0,370	0,49
0,29	0,0660	0,325	0,34	0,390	0,51
0,31	0,0754	0,350	0,36	0,415	0,53
0,33	0,0855	0,370	0,38	0,435	0,55
0,35	0,0962	0,390	0,41	0,455	0,57
0,38	0,113	0,420	0,44	0,490	0,60
0,41	0,132	0,450	0,47	0,520	0,63
0,44	0,152	0,485	0,50	0,550	0,66
0,47	0,173	0,515	0,53	0,580	0,69
0,49	0,188	0,535	0,55	0,600	0,71

Диаметр голового провода, <i>мм</i>	Сечение голового провода, <i>мм²</i>	Диаметр провода с изоляцией, <i>мм</i>			
		ГОСТ 2773-51	ГОСТ 7262-54	ГОСТ 6324-52	
		ПЭЛ и ПЭТ	ПЭВ-2	ПЭЛШО и ПЭЛШКО	ПБД
0,51	0,204	0,560	0,58	0,625	0,73
0,53	0,220	0,580	0,60	0,645	0,75
0,55	0,237	0,600	0,62	0,665	0,77
0,57	0,255	0,620	0,64	0,685	0,79
0,59	0,273	0,640	0,66	0,705	0,81
0,62	0,301	0,670	0,70	0,735	0,84
0,64	0,321	0,690	0,72	0,755	0,86
0,67	0,353	0,720	0,75	0,785	0,89
0,69	0,374	0,740	0,77	0,805	0,91
0,72	0,407	0,780	0,80	0,845	0,94
0,74	0,430	0,800	0,83	0,865	0,96
0,77	0,466	0,830	0,86	0,895	0,99
0,80	0,503	0,860	0,89	0,925	1,02
0,83	0,541	0,890	0,92	0,955	1,05
0,86	0,581	0,920	0,95	0,985	1,08
0,90	0,636	0,960	0,99	1,025	1,12
0,93	0,679	0,990	1,02	1,055	1,15
0,96	0,724	1,020	1,05	1,085	1,18
1,00	0,785	1,070	1,11	1,135	1,27
1,04	0,850	1,115	1,15	1,175	1,31
1,08	0,916	1,155	1,19	1,215	1,35
1,12	0,985	1,195	1,23	1,255	1,39
1,16	1,057	1,235	1,27	1,295	1,43
1,20	1,130	1,280	1,31	1,335	1,47
1,25	1,210	1,330	1,36	1,385	1,52
1,30	1,330	1,380	1,41	1,435	1,57
1,35	1,430	1,430	1,46	1,485	1,62
1,40	1,540	1,480	1,51	1,535	1,67
1,45	1,650	1,530	1,56	1,585	1,72
1,50	1,770	1,580	1,61	1,655	1,77
1,56	1,91	1,640	1,67	1,715	1,83
1,62	2,06	1,700	1,73	1,755	1,89
1,68	2,21	1,760	1,79	1,835	1,95
1,74	2,37	1,820	1,85	1,895	2,01
1,81	2,57	1,890	1,93	1,965	2,08
1,88	2,77	1,960	2,00	2,035	2,15
1,95	2,99	2,030	2,07	2,105	2,22
2,02	3,20	2,100	2,14	2,175	2,29
2,10	3,46	2,180	2,23	2,255	2,37
2,26	4,02	2,340	2,39	2,415	2,53
2,44	4,65	2,520	2,57	2,595	2,71

ПРИЛОЖЕНИЕ II

СЕРДЕЧНИКИ ИЗ ПЛАСТИН «БЕЗОТХОДНОЙ» ШТАМПОВКИ
ПО НОРМАМ СТ-360 А

Тип сердечника	Размеры сердечника, мм					
	a_c	b_c	$h_я$	H	b	
Ш-10 × 10	10	10	5	15	5	 b_c — толщина пакета
Ш-10 × 15	10	15	5	15	5	
Ш-10 × 20	10	20	5	15	5	
Ш-12 × 12	12	12	6	18	6	
Ш-12 × 18	12	18	6	18	6	
Ш-12 × 24	12	24	6	18	6	
Ш-14 × 14	14	14	7	21	7	
Ш-14 × 21	14	21	7	21	7	
Ш-14 × 28	14	28	7	21	7	
Ш-16 × 16	16	16	8	24	8	
Ш-16 × 24	16	24	8	24	8	
Ш-16 × 32	16	32	8	24	8	
Ш-18 × 18	18	18	9	27	9	
Ш-18 × 27	18	27	9	27	9	
Ш-18 × 36	18	36	9	27	9	
Ш-20 × 20	20	20	10	30	10	
Ш-20 × 30	20	30	10	30	10	
Ш-20 × 40	20	40	10	30	10	
Ш-24 × 24	24	24	12	36	12	
Ш-24 × 36	24	36	12	36	12	
Ш-24 × 48	24	48	12	36	12	
Ш-30 × 30	30	30	15	45	15	
Ш-30 × 45	30	45	15	45	15	
Ш-30 × 60	30	60	15	45	15	
Ш-40 × 40	40	40	20	60	20	
Ш-40 × 60	40	60	20	60	20	
Ш-40 × 80	40	80	20	60	20	

ПРИЛОЖЕНИЕ III

СТАЛЬ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ ТОНКОЛИСТОВАЯ
(ГОСТ 802-58)

Марки стали. Листовая электротехническая сталь по степени легирования ее кремнием, магнитным и электрическим свойствам подразделяется на следующие марки:

Э11, Э12

Э21

Э31, Э34, Э310, Э320, Э330, Э340, Э370

Э41, Э42, Э43, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48.

Буквы и цифры в марках электротехнической стали условно обозначают:

Э — электротехническая сталь.

Первая цифра (1, 2, 3, 4) — степень легирования кремнием:

- 1 — слаболегированная сталь;
- 2 — среднелегированная сталь;
- 3 — повышенолегированная сталь;
- 4 — высоколегированная сталь.

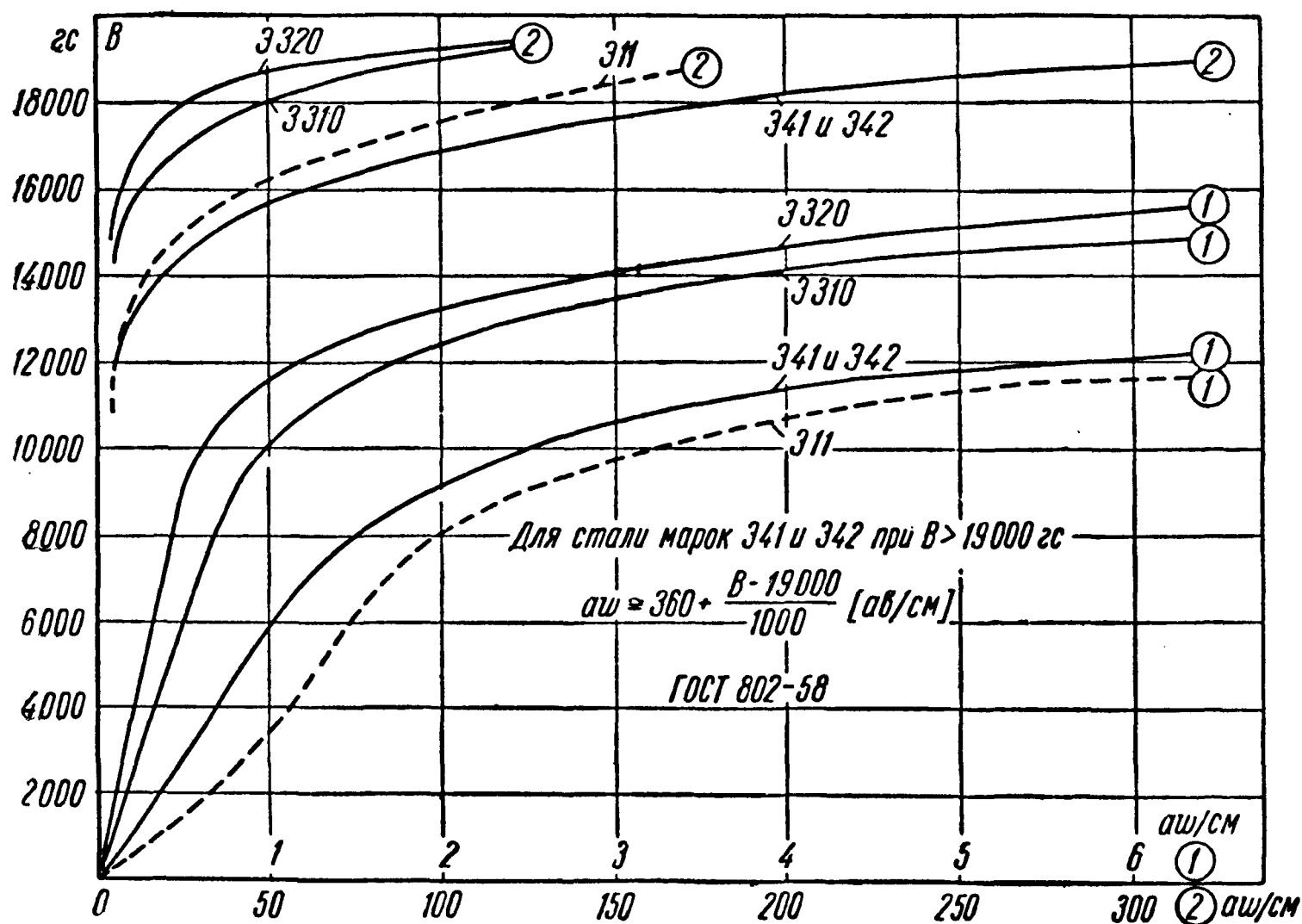


Рис. 12. Кривые намагничивания стали марок Э11; Э41; Э42; Э310 и Э320.

Вторая цифра (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) — гарантированные электромагнитные свойства стали:

1, 2, 3 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 50 гц и магнитная индукция в сильных полях;

4 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 400 гц и магнитная индукция в средних полях;

5, 6 — магнитная проницаемость в слабых полях (менее 0,01 ав/см);

7, 8 — магнитная проницаемость в средних полях (от 0,1 до 1 ав/см).

Третья цифра (0) обозначает, что сталь холоднокатаная.

Толщина и размеры листов стали

Марки стали	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, мм
Э11, Э12, Э21, Э31	0,5	750 1000	1500 2000
Э31, Э34, Э41, Э42, Э43, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48	0,35	750	1500
Э41, Э42, Э43	0,35 и 0,5	1000	2000
Э310, Э320, Э330	0,5	750	1500
Э310, Э320, Э330, Э340,	0,35	750	1500
Э370, Э340, Э370	0,20	240	1500
Э44, Э45, Э49, Э47, Э48	0,20, 0,15 0,10	700	1400

**Магнитные свойства и удельные потери некоторых
марок стали (табл. 1 и 2)**

Таблица 1

Марка стали	Тол- щина, мм	Магнитная индукция в гауссах при напряженности магнитного поля, ав/см					Удельные потери, вт/кг		
		B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{17/50}$
		не менее					не более		
Э11	0,5	—	15 000	16 200	17 500	19 700	3,3	7,9	—
Э41	0,5	13 000	14 500	15 600	16 800	18 800	1,60	3,60	—
Э41	0,35	13 000	14 500	15 600	16 800	18 800	1,35	3,20	—
Э42	0,5	12 900	14 400	15 500	16 600	18 700	1,40	3,20	—
Э42	0,35	12 900	14 400	15 500	16 600	18 700	1,20	2,80	—
Э310	0,5	15 700	17 000	18 000	19 000	19 800	1,25	2,80	3,80
Э310	0,35	15 700	17 000	18 000	19 000	19 800	1,00	2,20	3,20
Э320	0,5	16 500	18 000	18 700	19 200	20 000	1,15	2,50	3,50
Э320	0,35	16 500	18 000	18 700	19 200	20 000	0,90	1,90	2,90

Таблица 2

Марка стали	Толщи- на, мм	Магнитная индукция в гаус- сах при напряженности маг- нитного поля, <i>ав/см</i>			Удельные потери, <i>вт/кг</i>	
		<i>B</i> ₅	<i>B</i> ₁₀	<i>B</i> ₂₅	<i>P</i> _{7,5/400}	<i>P</i> _{10/400}
		не менее			не более	
Э310	0,35	14 600	15 700	17 000	12,0	21,0
Э310	0,20	14 000	15 500	16 700	7,0	12,0
Э44	0,35	11 800	12 900	14 300	10,7	19,0
Э44	0,20	11 800	12 800	14 200	7,2	12,5
Э44	0,15	11 600	12 800	14 100	6,8	11,7
Э44	0,10	11 500	12 700	14 000	6,0	10,5

Среднее удельное электрическое сопротивление стали *ρ*, *ом · мм²/м*:

Сталь Э11, Э12	0,25
» Э21	0,40
» Э31, Э310, Э320, Э330, Э340	0,50
» Э41, Э42, Э43, Э44 -	0,58

Scan by vadem

Цена 8 коп.